

高速电机驱动关键技术研究综述

鲍旭聪, 王晓琳*, 彭旭衡, 严廷雄, 高起兴

(多电飞机与电气系统重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 210016)

Review of Key Technologies of High-speed Motor Drive

BAO Xucong, WANG Xiaolin*, PENG Xuheng, YAN Tingxiong, GAO Qixing

(Key Laboratory of More Electrical System(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),

Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Due to the obvious advantages of high power density, small volume and weight, and high working efficiency, high-speed motors have been paid more and more attention. An efficient and stable driving system is the key to give full play to the excellent performance of a high-speed motor. This paper mainly analyzed the difficulties of the high-speed motor driving technology from the aspects of control strategy, angle estimation and power topology design, and summarized the current research results at home and abroad. Then, the high-speed motor drive technology and its development trend were summarized and prospected.

KEY WORDS: high-speed motor; driving technology; control strategy; rotor position estimation; power topology

摘要: 高速电机因其功率密度高、体积重量小、工作效率高等明显优势, 受到越来越广泛的关注。高效稳定的驱动系统是充分发挥高速电机优异性能关键所在, 该文主要从控制策略、转角估算以及功率拓扑设计等方面, 分别分析高速电机驱动技术的难点, 并总结归纳国内外当前研究成果, 之后对高速电机驱动技术及其发展趋势进行总结展望。

关键词: 高速电机; 驱动技术; 控制策略; 转子位置估计; 功率拓扑

0 引言

高速电机因其功率密度高、体积重量小、工作效率高等诸多优势, 在航空航天、国防安全、生产生活等领域有着广泛应用, 是当今必要的研究内容和发展方向^[1-2]。在电主轴^[3]、透平机械^[4]、微型燃气轮机^[5]、飞轮储能^[6-7]等高速负载场合, 高速电机

的应用能够实现直驱结构, 省去变速装置, 显著减小体积重量与维护成本的同时大幅提高可靠性^[8], 具有极其广阔的应用前景。高速电机通常指转速超过 10kr/min 或难度值(转速和功率平方根的乘积)超过 1×10^5 的电机^[9], 图 1 给出了当前国内外高速电机部分代表样机相关数据对比, 图 1 中虚线为 1×10^5 难度值等值线。国内外对高速电机研究已具备相当的基础, 其中瑞士苏黎世联邦理工学院将 500(kr/min)/100W 超高速永磁电机用于燃气涡轮机组的发电机部分^[10]; 拉彭兰塔工业大学研制了一台 12 (kr/min)/8MW 实心转子感应电动机^[11]; 英国戴森公司将一台 125kr/min 的超高速电机应用于其最新的 V11 COMPLETE 吸尘器上。国内, 南京航空航天大学研制了一台 550(kr/min)/110W 超高速微型永磁电机^[12]; 沈阳工业大学设计了一台 18 (kr/min)/1.12MW 高速永磁电机样机^[13]; 追觅科技公司为其最新产品 V12 无线吸尘器搭载了一台 150kr/min 极速马达。

然而, 电机系统高速化发展, 对电机本体及其驱动系统的设计提出了更高的要求。在高速电机本体设计方面, 轴承作为系统关键组成部件, 其工作性能和使用寿命受到离心力、摩擦发热^[14]等因素影响, 以磁轴承技术^[15]与无轴承技术^[16]为代表的磁悬浮支承技术由于刚度动态可调以及无摩擦等技术优势, 是当前高速电机本体设计一大趋势。在高速电机驱动系统设计方面, 其运行基频高、运行速域宽以及电机电感小^[17]的特性, 导致其系统载频比低、参数变化大及相电流纹波大。低载频比系统难以忽略延迟影响, 需要对时延效应进行补偿^[18]; 电机参数较大范围变化对控制系统的鲁棒性提出了极

基金项目: 国家自然科学基金项目(5217070613); 江苏省自然科学基金项目(BK20201297)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (5217070613); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20201297).

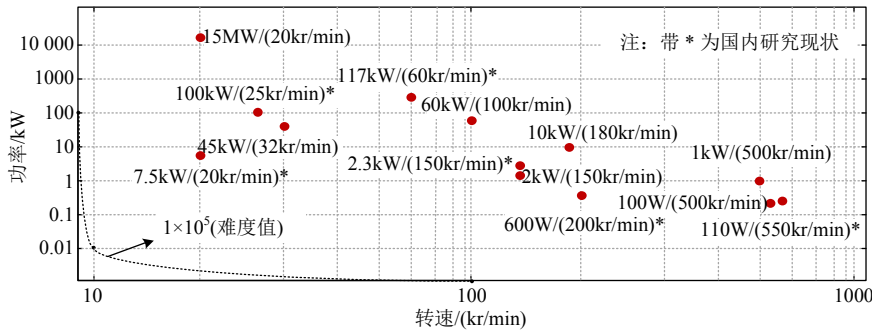


图 1 高速电机国内外发展现状

Fig. 1 Development status of high speed motor at home and abroad

高要求^[19]；大电流纹波带来的额外损耗、转矩脉动以及运行噪声，大大降低了系统性能^[20]，传统驱动方案已无法满足高速电机系统的高标准要求，易导致系统失稳甚至损坏。在高速电机驱动器方面，可编程逻辑器件(field-programmable gate array, FPGA)因其更强运算能力以及更快的计算速度，能更好适应高速电机驱动系统运行基频高的特性^[21-22]，正逐步取代传统数字信号处理器(digital signal processor, DSP)；SiC、GaN 等宽禁带功率器件的使用也是高速电机驱动器发展的一大趋势^[23-24]，降低系统开关损耗的同时能进一步提高开关频率。目前，国内外也已有众多学者对高速电机驱动技术进行了深入研究。

高效稳定的驱动系统为高速电机高性能运行提供了充分保障。本文首先从控制策略、转角估算以及功率拓扑设计 3 个方面分析高速电机驱动技术难点；而后，对国内外在此方面近年来的最新研究进行归纳和总结；最后，分析高速电机驱动技术当前面临的主要问题，并讨论未来高速电机驱动技术主要发展方向。

1 高速电机驱动技术难点

1.1 高基频下系统稳定性问题

当电机在高运行基频状态下时，由于受模/数转换时间、数字控制器算法执行时间以及逆变器开关频率等限制，高速电机驱动系统载频比较低，导致电机运行性能明显降低。低载频比下的高速电机驱动系统主要存在以下 2 个方面问题^[25]：

- 1) 电机运行在高转速下时，电机 dq 旋转坐标系下的磁链与转矩耦合严重；
 - 2) 载频比低会使高速电机驱动系统存在较大的数字控制延迟，加重电流环耦合。
- 上述 2 个问题综合表现为电机电流环耦合严

重，大大降低系统动态性能，严重时甚至会造成系统发散失稳。

1.2 高基频高精度转子位置估计问题

高速运行时，转子位置的精度对电机的运行性能至关重要。由于机械式位置传感器可靠性不高，且体积大、成本高，故在高速电机控制系统中常采用无位置传感器算法。但在高运行基频条件下，采用无位置传感器算法容易受到逆变器的非线性以及空间谐波、环路滤波器和电感参数偏差等非理想因素^[26-27]的影响，造成明显的转子位置估算误差。

上述问题给高速电机驱动系统转子位置估测带来极大挑战，严重影响系统稳定运行。

1.3 高速电机驱动系统纹波抑制问题

高速电机电感小，不可避免存在电流纹波大的问题。大电流纹波导致的额外铜损、铁损、转矩脉动以及振动噪声，会大大增加高速电机系统损耗、降低电机运行性能，且高振动噪声带来的电磁干扰会加速驱动器老化^[28-29]。

上述问题极大影响了高速电机驱动系统性能，低损耗硬件电路优化设计研究对高速电机驱动系统至关重要。

综上所述，高速电机驱动系统的设计，需要综合考虑多项因素，主要包括电流环耦合、系统延迟、参数误差以及电流纹波抑制等技术难点，是一个高度复杂的过程，对控制策略、转子位置估计精度以及功率拓扑设计提出了极高的要求，如图 2 所示。

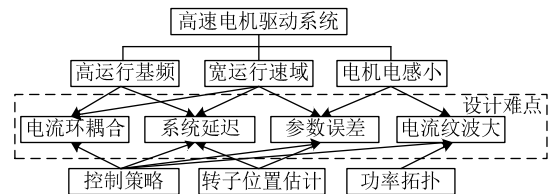


图 2 高速电机驱动系统设计难点及方案
Fig. 2 Difficulties and schemes of high speed motor drive system design

2 高速电机驱动系统控制策略

高速电机驱动系统因其高运行基频特点,系统载频比低,电机自身耦合问题与延迟问题尤为突出。本节将针对上述两大问题,对现有技术方案进行总结介绍。

2.1 高速电机控制系统建模

高速电机驱动系统高运行基频、低载频比的特点,电机自身耦合以及延迟对系统的影响已不可忽略。故在考虑上述两大因素条件下,对高速电机驱动系统重构建模分析,是进一步提升高速电机驱动性能的关键。

全面分析耦合与延迟对电机驱动系统的影响是高速电机控制系统精确建模的基础^[30-32]。文献[32]在考虑电机自身耦合以及数字控制延迟的条件下,对基于磁场定向控制(field oriented control, FOC)策略的永磁同步电机控制系统进行重构建模,控制系统模型如图3所示。

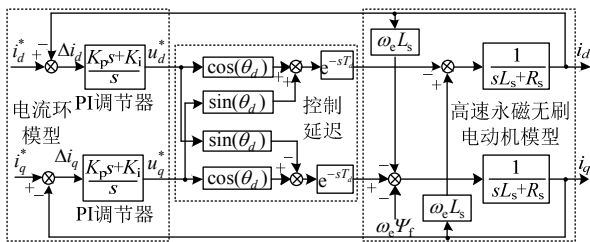


图3 考虑耦合与延迟后的永磁同步电机控制系统模型

Fig. 3 Permanent magnet synchronous motor control system model considering coupling and delay

图中: R_s 、 L_s 分别为定子等效电阻与等效电感; ψ_f 为永磁磁链; ω_e 为电机角速度; i_d 、 i_q 为 dq 轴电流; u_d 、 u_q 为 dq 轴电压; θ_d 为延迟角度; T_d 为延迟时间; K_p 、 K_i 分别为调节器的比例系数和积分系数; 上标*代表相应物理量的参考值,文章后同,不再赘述。

由图3可知:

- 1) 永磁同步电机自身耦合项,随着转速升高而变大, dq 轴间耦合效应严重;
- 2) 延迟在 dq 坐标系下表现为一个附加交叉耦合项和2个时间延迟环节,耦合效应与时延效应随着电机转速的提高加重。

对于高速电机驱动系统,上述耦合问题与延迟问题尤为突出。当电机高基频运行时,系统耦合严重,会大大降低电机运行性能。

为解决上述问题,当前主要有2种思路:省略坐标变换以及采用解耦控制技术。省略坐标变换采

用的控制策略主要有:开环控制^[33]、方波控制^[34]和直接转矩控制^[35]。开环控制精确度低的问题;方波控制低次谐波高、换向误差的问题;直接转矩控制转矩脉动、定子电流谐波含量高的问题,限制了上述3种策略在高性能电机驱动场合的应用。解耦控制技术是当前的研究热点。

2.2 高速电机解耦控制技术

在高性能电机驱动系统中应用最为广泛的是FOC控制技术,针对高运行基频造成的系统耦合严重问题,目前主要的研究方向为解耦控制策略。当前所研究的解耦控制策略主要可分为:基于模型的解耦控制策略^[36-37]、基于扰动补偿的解耦控制策略^[38-42]与基于复矢量调节器的解耦控制策略^[43-44]。基于模型的解耦控制策略主要有前馈解耦^[45]和反馈解耦^[46],但该策略对电机参数敏感,在参数误差较大的情况甚至会导致系统不稳定,且无法做到完全解耦,动态解耦性能差^[38],因而限制了其应用范围,后2种解耦控制策略是当前的研究热点。

2.2.1 基于扰动补偿的解耦控制技术

基于扰动补偿的解耦控制策略常采用内模解耦控制技术^[39]、偏差解耦控制技术^[40]、基于神经网络的解耦技术^[41]等。偏差解耦控制是内模解耦控制技术的变形,具有较强的鲁棒性,但两者由于存在积分环节,在进入稳态前均会出现震荡现象。基于神经网络的解耦方法,需要大量的实验样本数据进行离线训练,实现较复杂,不方便推广使用。

偏差解耦控制是当前应用较为广泛的方案,文献[42]提出了一种基于电流滑模观测器的电流偏差解耦控制方法,该方法在传统偏差解耦控制器的基础上,将 dq 轴电流耦合和高速电机参数变化引起的电压误差量视为扰动,利用滑模观测器对定子电流的跟踪特性,将定子电流的观测值反馈到系统输入端,以补偿电压误差值,实现电流环的解耦补偿控制。该方法有效解决了偏差解耦控制与被控对象失配条件下, dq 轴之间仍有解耦不完全的问题,改善了系统动态性能,且系统具有较强的鲁棒性,该方法控制框图如图4所示。其中, $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 分别为PI控制器的传递函数; f_1 、 f_2 为滑模观测器控制率;图4中 $\hat{\cdot}$ 表示相应物理量的估算值,文章后同,不再赘述。

2.2.2 基于复矢量调节器的解耦控制技术

复矢量的概念是由 Kovacs P K 和 Racz I 在1959年首次提出,使用复矢量建模除了使模型简洁

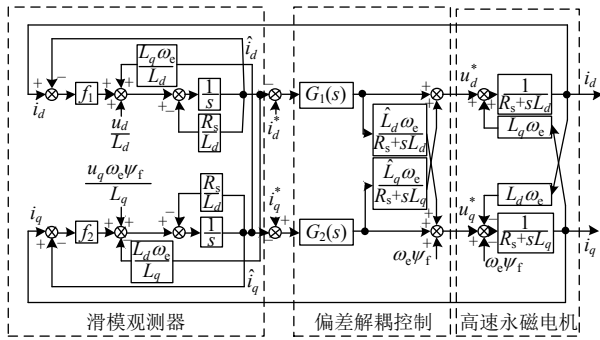


图 4 基于电流滑模观测器的电流偏差解耦控制框图

Fig. 4 Block diagram of current deviation decoupling control based on current sliding mode observer

之外，还能揭示系统内部的电磁关系，能够表示出各种线性与非线性函数，特别是可以形象地揭示出变量间的耦合关系^[43]。可通过建立基于复矢量形式的高速电机驱动系统模型，通过复矢量调节器的设计，实现系统解耦控制。

基于复矢量调节器的解耦控制策略的核心思想为通过合理设计复矢量调节器，实现调节器零点与被控对象复极点对消完全解耦。文献^[44]在考虑低载频比的高速电机驱动系统的信号采样延迟以及脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制惯性特性的前提下，搭建了低开关频率下同步电机电流内环复矢量模型，如图 5 所示。

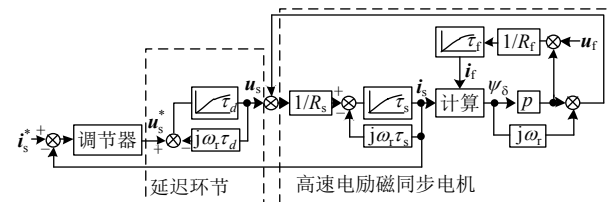


图 5 低开关频率下高速同步电机电流内环复矢量模型

Fig. 5 Complex vector model of high-speed synchronous motor current inner loop under low switching frequency

图中： u_s 、 u_r 、 i_s 、 i_r 为定子电压、激磁电压、定子电流、激磁电流的复矢量表示形式； ψ_δ 为气隙磁链； T_L 为负载转矩； ω_r 为转子机械角速度； $\tau_s=L_s/R_s$ ； $\tau_r=L_r/R_r$ ； $\tau_d=0.75T_s$ ； L_f 为激磁漏感； R_f 为激磁电阻； T_s 为开关周期。

由复矢量模型可知，系统的耦合是由复极点造成的，可通过合理设计复矢量电流调节器抵消该复极点，从根本上改善耦合现象，实现电机定子电流磁化分量和转矩分量的有效解耦，提升系统动态性能和稳态性能。复矢量调节器结构框图如图 6 所示，其中 k_0 为开环增益有关的调节系数。

2.3 高速电机系统延迟补偿技术

解耦控制技术能较好地解决高速电机驱动系

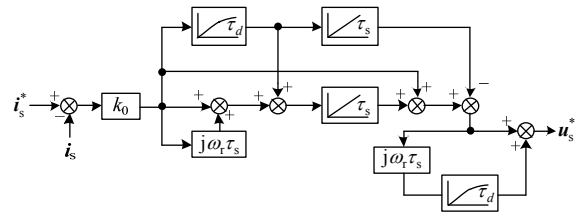


图 6 复矢量调节器结构框图

Fig. 6 Block diagram of complex vector regulator

统的耦合问题，但延迟引入的时延环节仍存在，故需要对系统延迟进行有效的主动补偿。目前系统延迟的主动补偿策略主要分为 2 种：基于模型的补偿策略及不依赖模型的补偿策略。

2.3.1 基于模型的补偿策略

基于模型的补偿策略主要有史密斯预估器^[45]、模型预测^[46]等，该策略因参数依赖性高而限制了其应用范围，尤其在运行速域较广的高速电机驱动系统中，电机参数随运行工况变化较大，参数误差问题尤为突出。其中，史密斯预估器是一种经典的固定延迟补偿方案，其余 2 种方案均由史密斯预估器衍化而来。

为解决上述问题，文献^[47]提出了一种适用于高速、低载波比下的永磁同步电机预测电流控制方法，搭建考虑转子位置变化的电流预测模型，如图 7 所示，并在此基础上提出预测电流控制方案，将电流分为自由分量和强制分量分别进行预测叠加，以补偿时延环节。其中，上标 k 、 $k+1$ 代表相应时刻物理量的值；下标 1、2 分别代表自由分量和强制分量。

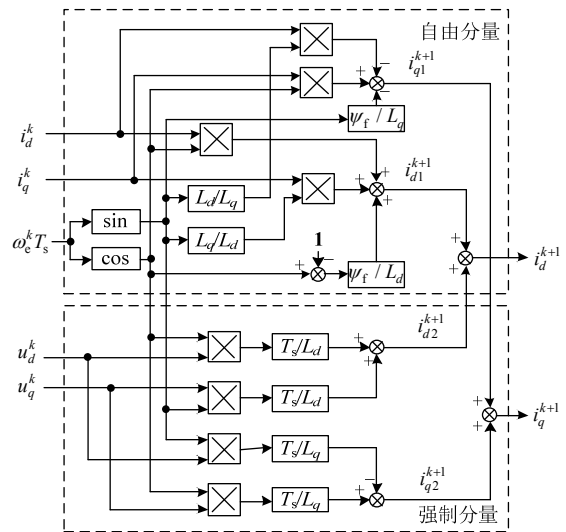


图 7 低载频比适用的电流预测离散域模型

Fig. 7 Discrete domain model for current prediction with low carrier frequency ratio

针对电机参数误差问题，提出电流偏差补偿方

案,通过当前时刻电流实际值与预测值作差获取电流补偿值,对电流预测值与电流参考值进行修正,补偿了参数误差导致的电流偏差,提高了系统的鲁棒性。上述方案的整体控制框图如图8所示。其中, u_{α} 、 u_{β} 代表 $\alpha\beta$ 坐标系下定子电压;下标0与c分别表示相应物理量的预测值和补偿值;上标'表示相应物理量的修正值,文章后同,不再赘述。

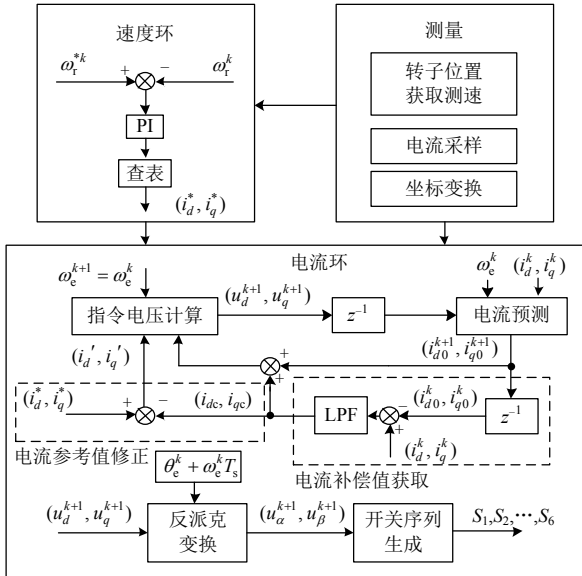


图8 预测电流控制框图

Fig. 8 Diagram of the PCC

2.3.2 不依赖模型的补偿策略

不依赖模型的补偿策略主要有:线性预测法^[48]、双采样双更新法^[49]及滤波器法^[50]等。使用线性预测法的前提为被控系统具有严格线性化,不适用于非线性程度较严重的高速电机驱动系统。双采样双更新策略对算法执行所造成的一个载波周期的延时进行了补偿,但该方法需要根据占空比改变装裁点,故不适用于多相系统。

当前对基于滤波器法的补偿策略研究较多,文献^[50]利用脉冲面积等效法对基于线性预估器、基于一阶滤波器以及基于二阶广义积分器的延迟补偿策略进行对比分析,第一种方案并不适用于非线性系统,后2种方案均存在补偿极限。为进一步提升补偿效果,此文章提出了一种基于附加面积插入的改进型高速电机系统延迟补偿策略,如图9所示。

图中 $r(k)$ 、 $s(k)$ 、 $c(k)$ 、 $c'(k)$ 分别为理想信号、考虑延迟后的实际信号、使用传统补偿策略补偿信号以及使用所提改进型补偿策略的补偿信号。与基于二阶广义积分器补偿策略相比,所提方案插入一个额外的区域A,以使补偿信号更加接近于理想信号。所提方案原理滤波器结构图如图10所示,其

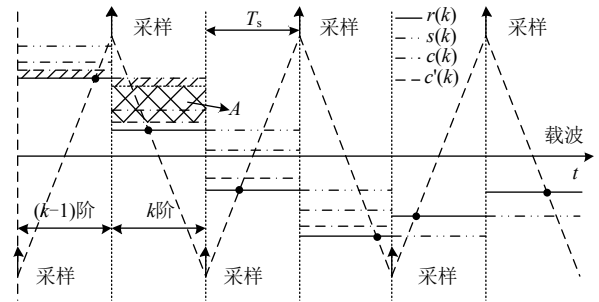


图9 改进型延迟补偿方案图解说明

Fig. 9 Illustration of an improved delay compensation scheme

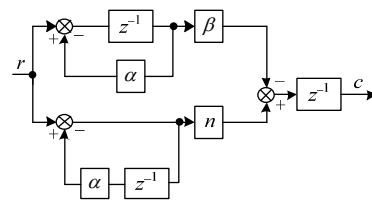


图10 改进滤波器法补偿方案

Fig. 10 Improved filter compensation scheme

中 α 、 β 为调节系数, $n=1+\alpha+\beta$, 该方案具有更宽的相位补偿频率。

3 高基频转子位置估测方案

转子位置精确与否将直接影响高速电机的运行性能。传统电机控制系统通过霍尔元件、光电编码器与旋转变压器等机械式位置传感器直接获取转子位置信息,但应用于高速电机时,存在众多非理想因素的影响,导致位置检测不准确,因此往往采用基于无位置传感器的算法。

3.1 无位置传感器转子位置估测方案

基于无位置传感器的控制算法根据估测数学模型坐标系的不同可分为:基于 $\alpha\beta$ 坐标系下转子磁链反电动势估计法^[51-59]以及基于dq坐标系下无位置传感器算法^[60-66]。

3.1.1 基于 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型位置估测

基于 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型位置估测包括:反电势积分估算法^[51]、高频注入法^[52-53]、基于模型参考自适应系统(model referencing adaptive system, MRAS)估算法^[54-57]、基于滑模观测器(sliding mode observer, SMO)观测法^[58-59]。在高速电机领域,前述3种方法由于参数不稳定、引入额外参量等问题导致位置观测误差较大,目前国内外学者以优化MRAS算法和SMO算法为主。其中,MRAS算法以其低速性能优越、动态性能良好等显著优势被广泛使用,但仍存在电机参数敏感、调速性能差等问

题。因此，还有部分学者采用滑模观测器估算高速电机转子位置，该方法优势在于对参数变化及外部扰动不敏感，鲁棒性较强，但上述方案低速抖振现象难以避免。下面对当前高速电机无位置控制领域中基于上述 2 种方法的最新研究进行总结归纳。

基于 MRAS 的无位置传感器算法中参考模型及可调模型都以电机数学模型为基础，参数敏感性问题尤为突出^[54]。且其中常用的传统自适应调节器的动稳态性能只能在某一速度区域调整为最佳^[55-56]，无法适应高速电机的宽转速运行域。文献[57]针对前述问题以及低速时转子位置检测振荡问题，提出了一种基于模糊 PI 的模型参考自适应观测器，通过模糊控制器调整用于位置观测的 PI 调节器参数，以使该系统中的 PI 调节器能在高速电机较宽运行速度范围内都具有良好的动稳态性能，提高了模型参考自适应观测器位置检测精度。

该团队进一步将 SMO 应用于高速电机系统，由于 SMO 需要利用滑模增益参数在系统稳定性和低速抖振中取舍。对此，文献[59]提出了一种“模糊控制+滑模观测器”的转子位置检测方法，其中模糊控制用于确定滑模增益，实时保证滑模增益适用于各个转速域，提高了滑模观测器的动态性能，有效地抑制了滑模低速抖振现象。上述 2 种基于模糊控制的无位置传感器控制结构框图如图 11 所示。

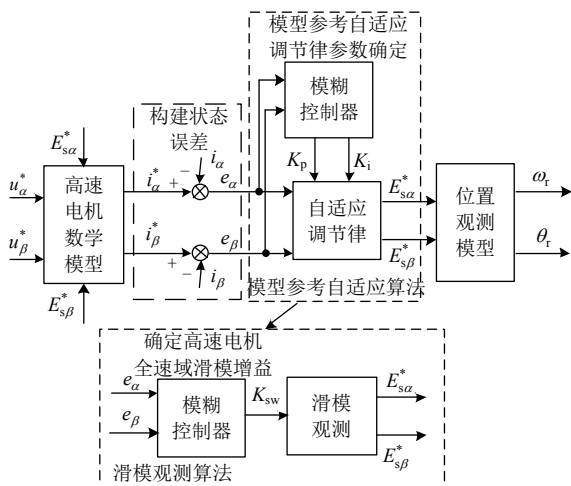


图 11 2 种基于模糊控制的位置观测模型
Fig. 11 Two position observation models based on fuzzy control

图中： $E_{s\alpha}$ 、 $E_{s\beta}$ 、 i_α 、 i_β 、 e_α 、 e_β 分别为反电动势、定子电流以及系统状态误差在 $\alpha\beta$ 轴分量； K_{sw} 为滑模增益； θ_r 为转子位置角。

3.1.2 基于 dq 坐标系数学模型位置估测

由于基于 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型的无位置传感器

算法存在无法全速域运行或参数敏感等问题，还有学者将基于 dq 坐标系数学模型应用于高速电机系统中。由于高速电机系统载频比较低，当前主要研究方向为使用基于 dq 坐标系下数学模型的反电动势(electromotive force, EMF)估算方法，以提高观测器估算带宽^[60]。还有学者考虑到控制延迟、电感交叉耦合^[61-62]及 PWM 延迟^[63]等非理想因素对转子位置估算产生的影响，进一步采用同步全阶观测器^[64-65]。

为解决上述电感交叉耦合和 PWM 延迟等问题，文献[66]提出一种适用于高速电机驱动的基于离散 EMF 估计的无位置传感器算法，将电感交叉耦合和 PWM 调制延迟对转子位置估计误差影响最小化，同时该算法可忽略电流振荡。考虑了电感交叉耦合、反电动势交叉耦合和 PWM 调制延迟对位置估测的影响，分析了高速电机离散化数学模型，如图 12 所示。

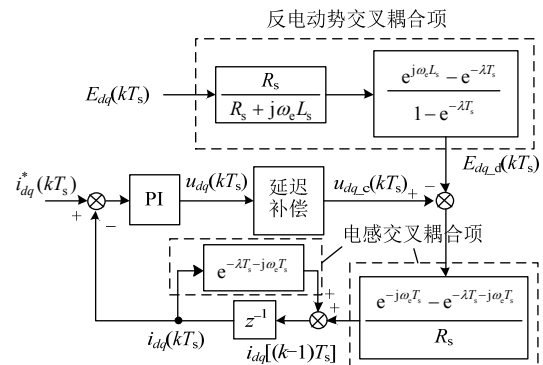


图 12 基于电感交叉耦合影响的离散化电流观测器模型
Fig. 12 Discrete current observer model based on inductance cross coupling effect

图中： $u_{dq}(kT)$ 、 $E_{dq}(kT)$ 、 $i_{dq}(kT)$ 分别为 k 时刻定子电压、反电动势、定子电流 dq 分量实际值； $\lambda=R_s/L_s$ ；下标_c 表示对应物理量考虑延迟补偿影响后的值；下标_d 表示对应物理量考虑反电动势交叉耦合项影响后的值。在建立了上述离散化电流观测器后，文章提出基于离散化 EMF 模型进行位置估测，其估测结构如图 13 所示。

使用上述离散化的电流及位置观测器减小了高速电机电感交叉耦合和固有 PWM 延迟产生的观测误差，同时消除了反电动势交叉耦合对高速电机位置观测模型的影响。

3.2 位置估测误差补偿

在高速电机系统中，位置检测往往存在误差，影响系统稳定性^[67]，文献[68]将无位置传感器算法中的位置估测误差分为基频相关误差和非基频相关误差。基频相关误差主要由环路滤波器导致系统

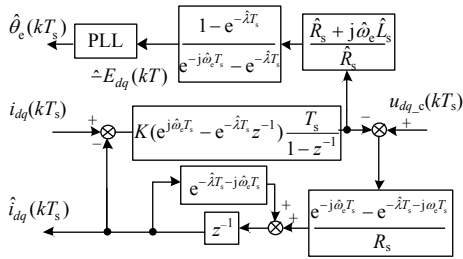


图 13 基于离散 EMF 模型的位置估计模型
Fig. 13 Position estimation model based on discrete EMF model

相频特性发生变化而产生，随电机基频的升高增大；非基频误差主要包括参数偏差、采样偏差等。

在高速电机系统中，采用有效的位置误差补偿策略，是提升无位置传感器位置观测精确度的关键所在。目前国内外关于位置误差补偿研究热点主要集中在基于扩展卡尔曼滤波器算法的位置补偿策略^[69-70]以及基于锁相环的位置误差补偿策略^[71-72]。

3.2.1 基于扩展卡尔曼滤波器位置误差补偿

扩展卡尔曼滤波器(extended kalman filter, EKF)算法作为基于最小方差估计理论发展起来的一种无速度传感器算法思想，提供了一种对非线性化严重的高速电机系统进行精确在线估计的解决方案，即使高速电机存在参数变化/低速参数扰动，也会被 EKF 系统当作干扰处理，能精确地对状态变量进行估计和补偿^[69-70]。在高速电机这个非线性严重的控制系统中，传统 EKF 中的固定噪声先验模型无法代表实际噪声情况，会导致 EKF 的滤波准确度降低甚至发散，对此，文献[70]提出了一种基于粒子群优化(particle swarm optimaization, PSO)的模糊 EKF 转速估计方案，利用模糊控制在线实时调整噪声矩阵使其逐渐逼近真实噪声水平，再利用粒子群优化算法对模糊控制参数进行优化设计，提高控制准确度，从而弥补了传统 EKF 算法的缺陷，其控制结构如图 14 所示， P_r 、 C_r 分别为残差方差的理论值和实际值； S_k 为模糊调整因子；下标_p 表示经 PSO 模糊控制器调整后的实际值。

3.2.2 基于锁相环位置误差补偿

为实现位置观测误差全补偿，文献[71]在基于反电动势滑模观测器(electromotive force-sliding mode observer, EMF-SMO)的位置估计方案的基础上，结合正交锁相环的思想，提出使用一种双重锁相环算法，对高速电机位置估计过程中滤波器、零阶保持器、代数环等非理想环节引起的相位估计误差实现全补偿。其基本原理在于，通过主动引入前

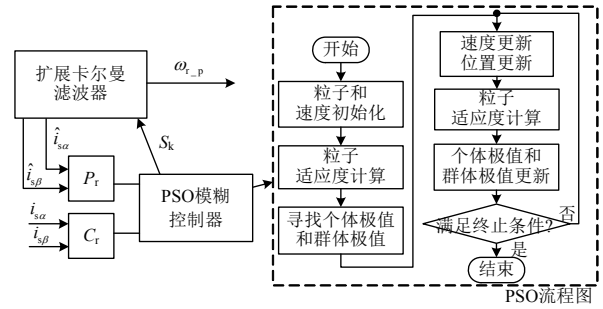


图 14 基于 PSO-EKF 位置估算结构图
Fig. 14 Structure diagram of position estimation based on PSO-EKF

述非理想环节，对电流信号进行误差重构，将重构电流信号与估计位置信号进行再次锁相，形成双重锁相环，其基本结构如图 15 所示。其中，下标_delay 表示为考虑误差影响下的相应物理量； $\Delta\theta_c$ 为角度误差补偿值； $\theta_{r,c}$ 为考虑误差全补偿的转子位置角。

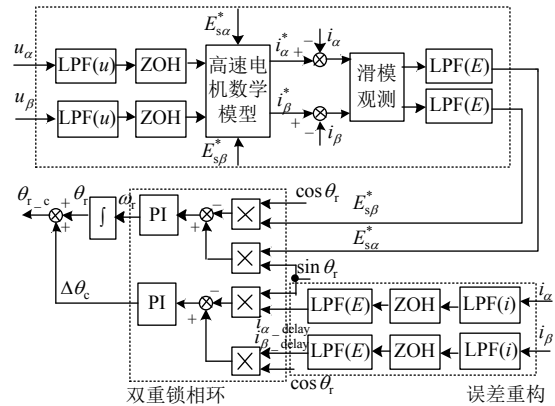


图 15 基于双重锁相环的 EMF-SMO
Fig. 15 EMF-SMO based on dual-PLL

4 高频低损耗硬件电路优化

高速电机电感小、高运行基频的特性，导致其驱动系统电流纹波大，会造成系统损耗高和运行噪声大等问题，这是高速电机驱动系统当前面临的重要问题之一。为解决上述问题，从硬件电路优化角度，目前主要有以下 3 种思路：提高开关频率、外加滤波以及优化逆变器拓扑。

4.1 提高开关频率

提高系统开关频率最直接的方式为采用宽禁带器件，例如以 GaN、SiC 为半导体材料的宽禁带器件。高开关频率的宽禁带器件应用于高速电机系统中可以更好的实现电机高可靠、高稳定驱动。当前有众多学者在此方面做了大量的研究，对不同开关频率下的性能进行了比较和研究^[73-74]。

宽禁带器件在高速电机驱动中的应用和发展趋势日益普遍，当前的主要问题为高开关频率、高

电压变化率与电磁干扰之间的取舍。文献[75]针对反向导通和开关损耗最小化，设计了一种 SiC 和 Si 混合的高速电机驱动器，并提出了一种专用的空间矢量调制方案，所提方案具有较高的功率密度和相对较低的成本并减小了整个驱动系统损耗。

4.2 无源滤波

由于电感小、高基频特性导致的电流纹波、电磁力纹波大，进而产生较大的定转子铁损与振动噪声，严重影响高速电机系统可靠性。抑制电流纹波目前常采用在回路中增加无源滤波器，但传统无源滤波器存在多种缺陷，例如体积大、结构复杂、以及无法适应负载多变的工况等。国内外学者近年来已针对此问题进行了探究与改进，主要从滤波器结构设计^[76-77]和控制算法改进^[78-79]2 个方面进行研究。文献[79]采用 LC 滤波器以抑制高速电机电流纹波，为避免引入谐振尖峰的问题，采用逆变器侧电流反馈(inverter current feedback, ICF)控制策略。基于 $i_d=0$ 的 ICF 控制策略能使逆变器侧电流误差为 0，但由于电容支路电流基波无法忽略，电机电流无法满足 $i_d=0$ ，不可避免地会向电机注入励磁电流分量，因此采用基于二阶广义积分器(second-order general integrator, SOGI)的电容电压微分算法求取电容电流基波分量，将电容电流信息加入闭环控制，实现对电机电流的准确控制，其整体系统框图如图 16 所示。

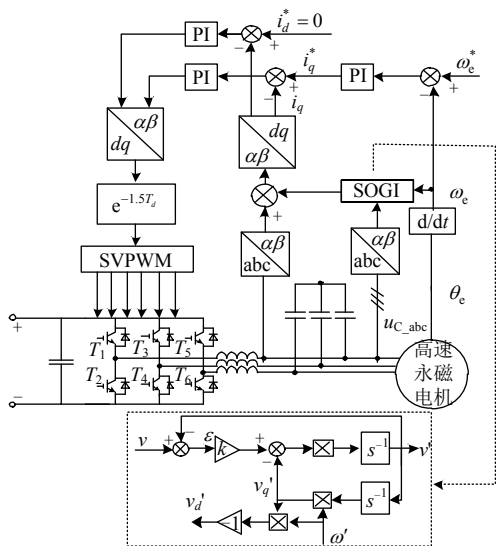


图 16 带 LC 滤波器的高速电机控制系统框图

Fig. 16 Block diagram of high speed motor control system with LC filter

图中： v 为输入信号； k 为比例增益； ω' 为基波角频率； v' 、 v_q' 和 v_d' 分别为输出基波信号及其正交

信号和微分信号； u_{c_abc} 为三相电容电压。

虽然学界针对无源滤波器进行了大量的改进，但无源滤波系统体积大、额外铁损等问题限制了其实际应用。为解决上述缺陷，目前已有不少学者从逆变器拓扑优化角度进行改进。

4.3 逆变器拓扑优化

逆变器作为高速电机驱动的主要功率变换部分，优化逆变器拓扑角度不仅能够提高系统整体效率，亦可在抑制电流纹波的基础上减小滤波电感电容值，从而减小高速电机系统的体积、节约成本。

电压源型逆变器是当前电机控制领域应用较广的拓扑类型，但因其对电压斩波以及使用定子电感续流的特性，故在高速电机的驱动效果较差。多电平逆变器和电流源型逆变器是当前高速电机逆变器拓扑应用的趋势。

4.3.1 多电平逆变器

多电平逆变器较传统两电平逆变器可以输出更多电压矢量，显著降低电压谐波含量，从而避免了滤波器的使用，且具有更高的逆变效率，可有效解决高速电机驱动系统固有难点问题。当前众多学者对多电平逆变器的控制以及拓扑研究有了许多创新，目前主要有：T 型中点钳位三电平逆变器^[80]、六开关三相逆变驱动器^[81]以及对称混合式九电平逆变器^[82-83]等方案。

针对高速电机驱动系统电流纹波大的问题，文献[84]首先基于戴维南等效电路分析了三电平逆变器在不同电压矢量作用下的输出电流变化率，根据母线电压、输出电感、占空比以及开关频率准确预测输出电流纹波峰值。并在此基础上提出一种基于电流纹波预测的三电平变开关频率 PWM，在控制电流纹波峰值满足给定值的条件下动态调整开关频率从而减小开关频率与开关损耗；其次，文章基于空间矢量脉宽调制技术提出了一种适用于高速电机驱动系统的三电平 SPWM 中点平衡算法，通过向三相调制波中注入特定的零序电压分量从而实现中点电位的调节，可以有效减小开关损耗并且分散电流频谱，抑制 EMI 噪声，有利于电机高速运行的稳定性，其硬件拓扑结构及控制算法如图 17 所示。

图中： i_{rippe_A} 、 i_{rippe_B} 、 i_{rippe_C} 为三相电流纹波峰值； d_A 、 d_B 、 d_C 分别为 A、B、C 三相的开关占空比； i_{rippe_max} 为纹波峰值最大值； T_n 为下一控制周期的实际开关周期； C_{MPA} 、 C_{MPB} 、 C_{MPC} 为变开关频

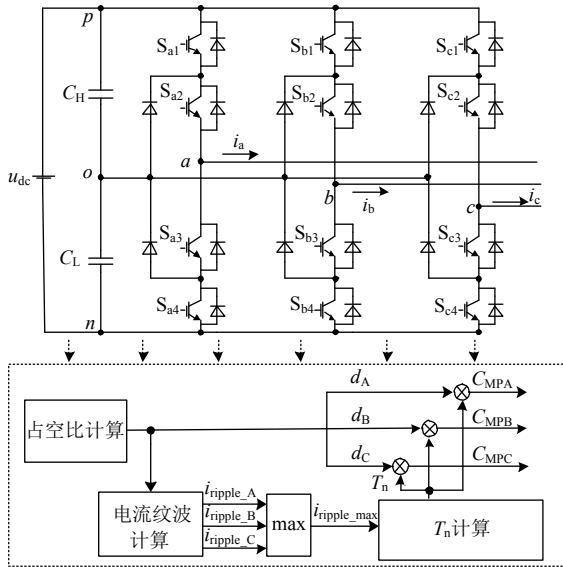


图 17 二极管中点钳位型三电平逆变器拓扑及控制算法
 Fig. 17 Topology and control algorithm of diode neutral point clamped three level inverter

率对应三相载波比较值。

多电平逆变器通过增加输出电平，提高了系统载频比，从拓扑角度解决了高速电机驱动系统电流纹波大的问题。但是，多电平拓扑意味着多开关器件，大大增加了驱动器的体积和价格，不适合于多数考虑集成化与经济性的应用场合。

4.3.2 电流源型逆变器

电流源型逆变器不仅可以实现低载频比时低电流纹波，并且由于电流源型逆变器在直流通路上串接电感，而高速电机本身具有电感小电流纹波大的特性，相比于电压源型逆变器，还可以胜任较高的开关频率，并能够很好的抑制电流纹波，这与高速电机驱动的要求相契合。

针对电流源型逆变器拓扑的优化，目前学者主要通过改进开关模式来抑制开关器件两端的电压尖峰，从而达到降低电机转矩波动，抑制机械振动的效果^[85]。针对电流逆变器调制策略方面的研究^[86]目前主要有：主动式非线性调制控制策略^[87]、无源性控制策略^[88]以及分段式控制策略^[89]。传统电流源型逆变器因其拓扑中存在更多的储能元件，所以电机驱动系统存在控制对象阶次高、电流调节器设计困难等问题。

针对传统电流源型逆变器 (current source inverter, CSI) 高速电机驱动系统存在的缺点，文献^[90]提出了适用于超高速电机驱动系统的基于混合型两级式 CSI 改进型控制策略。通过前级引入宽禁带器件高频调节定子电流幅值；后级采用普通 Si

件调节定子电流相位实现电机换相。为了实现最大转矩电流比控制，文献在上述改进型控制策略的基础上提出了单电流传感器锁相环方案，通过对转子位置信号与相电流锁相实现电流相位自动校正。改进型策略控制结构如图 18 所示。

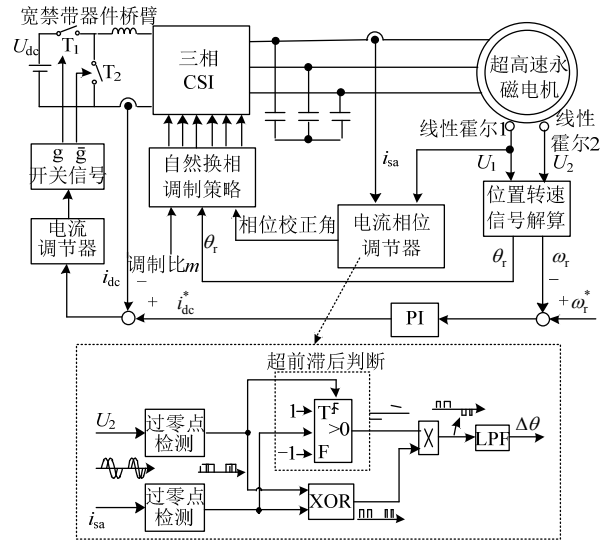


图 18 电流源型逆变器拓扑改进型控制策略框图
 Fig. 18 Block diagram of topology improved control strategy for current source inverter

图中： U_1 、 U_2 指线性霍尔传感器分别对电流信息和位置信息的采样电压信号； $\Delta\theta$ 为相位校正角； i_{sa} 指电机侧 A 相电流； i_{dc} 为直流侧电流。

该文献所提控制策略相比于传统 CSI 控制策略具备如下优势：1) 前级采用宽禁带器件高频开关有助于在低储能电感下获得平滑直流源；有助于简单的滞环控制器的应用；有助于为后级定调制比控制策略应用提供基础。2) 后级采用单电流调节器锁相环方案，后级实现降阶控制，相比于传统 CSI 控制策略提高了系统稳定性与控制性能；无需坐标变换，缩减体积的同时简化了控制结构。

5 结论

1) 高速电机驱动系统因其高运行基频特点，系统载频比低，电机自身耦合问题与延迟问题尤为突出。针对耦合问题，当前多采用解耦控制技术，基于扰动补偿以及基于复矢量调节器的解耦控制技术是目前的研究热点。针对延迟问题，基于模型以及不依赖模型的延迟主动补偿策略为当前常用方案。

2) 高速电机驱动系统通常采用基于无位置传感器的转子位置估测方案，主要有 $\alpha\beta$ 坐标系下基于反电动势估算法以及 dq 坐标系下无位置传感器算

法等。为进一步提高高速电机转子位置估算精度, 相关学者详细分析了位置估算过程中误差产生机理并提出了补偿策略, 目前研究热点主要集中在基于扩展卡尔曼滤波器的位置误差补偿策略以及基于锁相环的位置误差补偿策略。

3) 高速电机电感小、高基频的特性, 导致其驱动系统电流纹波大, 会造成系统损耗高、运行噪声大等问题, 针对上述问题, 提高开关频率和外加滤波是最直接的方案, 但额外损耗与系统体积庞大等问题限制了其应用范围, 当前学界主要从功率拓扑优化角度出发, 并结合改进型控制算法, 实现高速电机驱动系统电流纹波抑制。

综合当前学界在高速电机驱动技术方面的研究成果, 结合现有问题, 高速电机发展和研究方向主要有: 1) 高基频电流精准预测及主动补偿延时相关问题研究; 3) 高速电机高动态性能控制算法研究; 4) 超高速电机转角位置精确估测及全速域转子位置估算模型研究; 5) 高速电机位置估算模型中误差全补偿技术研究; 6) 高速电机功率拓扑高频高损耗问题研究。

参考文献

- [1] 高起兴, 王晓琳, 丁强, 等. 超高速微型永磁电机转子强度分析与结构设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2856-2866.
GAO Qixing, WANG Xiaolin, DING Qiang, et al. Strength analysis and structure design of ultra high speed micro permanent magnet motor rotor[J]. Proceedings of CSEE, 2021, 41(8): 2856-2866(in Chinese).
- [2] GU Cong, WANG Xiaolin, SHI Xiaoqing, et al. A PLL-based novel commutation correction strategy for a high-speed brushless DC motor sensorless drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3752-3762.
- [3] WANG Bo, ZHANG Jing, YU Yong, et al. Unified complex vector field-weakening control for induction motor high-speed drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7000-7011.
- [4] LIU Guangwei, LIU Meiyang, ZHANG Yue, et al. High-speed permanent magnet synchronous motor iron loss calculation method considering multiphysics factors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5360-5368.
- [5] 沈建新, 秦雪飞, 尧磊, 等. 高速永磁电机转子强度分析与护套设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2334-2346.
SHEN Jianxin, QIN Xuefei, YAO Lei, et al. Rotor strength analysis and retaining sleeve design for high-speed PM machines[J/OL]. Proceedings of CSEE, 2022, 42(6): 2334-2346(in Chinese).
- [6] 张翔. 飞轮储能系统高速永磁同步电动/发电机控制关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
ZHANG Xiang. Control of high-speed PMSM/G for flywheel energy storage systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019(in Chinese).
- [7] SONG Xinda, HAN Bangcheng, ZHENG Shiqiang, et al. High-precision sensorless drive for high-speed BLDC motors based on the virtual third harmonic back-EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1528-1540.
- [8] 许欣, 邓智泉, 张忠明, 等. 高速电机定子单槽绕组交流损耗近似解析建模及验证[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4306-4315.
XU Xin, DENG Zhiquan, ZHANG Zhongming, et al. Approximate analytical modeling and verification of AC loss in stator single slot windings of high speed motor[J]. Proceedings of CSEE, 2021, 41(12): 4306-4315(in Chinese).
- [9] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1-18.
ZHANG Fengge, DU Guanghui, WANG Tianyu, et al. Review on development and design of high speed machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 1-18(in Chinese).
- [10] ZWYSSIG C, ROUND S D, KOLAR J W. An ultrahigh-speed, low power electrical drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 577-585.
- [11] PYRHÖNEN J, NERG J, KURRONEN P, et al. High-speed high-output solid-rotor induction-motor technology for gas compression[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 272-280.
- [12] 高起兴, 王晓琳, 顾聪, 等. 基于多耦合特性的整体支撑式超高速微型永磁电机设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2989-2999.
GAO Qixing, WANG Xiaolin, GU Cong, et al. Design of Ultra High speed micro permanent magnet motor with integrated support type based on multi coupling characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2989-2999(in Chinese).
- [13] ZHANG Fengge, DU Guanghui, WANG Tianyu, et al. Rotor retaining sleeve design for a 1.12-MW high-speed PM machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3675-3685.
- [14] 董剑宁, 黄允凯, 金龙, 等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640-4653.

- DONG Jianning, HUANG Yunkai, JIN Long, et al. Review on high speed permanent magnet machines including design and analysis technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4640-4653(in Chinese).
- [15] 禹春敏, 邓智泉, 梅磊, 等. 基于精确磁路的新混合型轴向-径向磁悬浮轴承研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1219-1228.
- YU Chunmin, DENG Zhiqian, MEI Lei, et al. Research of new hybrid axial-radial magnetic bearing based on accurate magnetic circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1219-1228(in Chinese).
- [16] 丁强, 王晓琳, 邓智泉, 等. 大气隙磁通切换无轴承永磁电机径向力绕组设计与比较[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2403-2413.
- DING Qiang, WANG Xiaolin, DENG Zhiqian, et al. Design and comparison of radial force winding configurations for wide air-gap flux-switching bearingless permanent-magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2403-2413(in Chinese).
- [17] WANG Lu, ZHU Ziqiang, BIN Hong, et al. A commutation error compensation strategy for high-speed brushless DC drive based on Adaline filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 3728-3738.
- [18] AISO K, AKATSU K, AOYAMA Y. A novel flux-switching magnetic gear for high-speed motor drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4727-4736.
- [19] CHO H W, KO K J, CHOI J Y, et al. Rotor natural frequency in high-speed permanent-magnet synchronous motor for turbo-compressor application[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4258-4261.
- [20] HUANG Ziyuan, FANG Jiancheng, LIU Xiquan, et al. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2027-2035.
- [21] TU Wencong, LUO Guangzhao, CHEN Zhe, et al. FPGA implementation of predictive cascaded speed and current control of PMSM drives with two-time-scale optimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5276-5288.
- [22] MONMASSON E, CIRSTEA M N. FPGA design methodology for industrial control systems-a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1824-1842.
- [23] 王晓琳, 刘雨婷, 顾聪, 等. 混合型逆变器的空间矢量调制策略优化[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 324673.
- WANG Xiaolin, LIU Yuting, GU Cong. Optimization of space vector modulation strategy based on hybrid inverter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 324673(in Chinese).
- [24] 王琰. 基于 SiC MOSFET 的高速永磁同步电机驱动控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG Yan. Research on high-speed permanent magnet synchronous motor drive and control technology based on SiC MOSFET[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).
- [25] 张志坚, 荆龙, 赵宇明, 等. 高速低开关频率下永磁同步电机的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6345-6353.
- ZHANG Zhijian, JING Long, ZHAO Yuming, et al. Decoupling control of permanent magnet synchronous motor at high speed and low switching frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6345-6353(in Chinese).
- [26] 刘计龙, 肖飞, 沈洋, 等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 76-88.
- LIU Jilong, XIAO Fei, SHEN Yang, et al. Position-sensorless control technology of permanent-magnet synchronous motor-a review[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 76-88(in Chinese).
- [27] 刘刚, 崔臣君, 韩邦成, 等. 高速磁悬浮无刷直流电机无位置换相误差闭环校正策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 100-109.
- LIU Gang, CUI Chenjun, HAN Bangcheng, et al. Closed loop control strategy to correct the commutation error of high-speed magnetically suspended brushless DC motors without position sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 100-109(in Chinese).
- [28] JEONG T C, KIM W H, KIM M J, et al. Current harmonics loss analysis of 150-kW traction interior permanent magnet synchronous motor through Co-analysis of $d-q$ axis current control and finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2343-2346.
- [29] HARA T, AJIMA T, TANABE Y, et al. Analysis of vibration and noise in permanent magnet synchronous motors with distributed winding for the PWM method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6042-6049.
- [30] ALTOMARE A, GUAGNANO A, CUPERTINO F, et al. Discrete-time control of high-speed salient machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 293-301.

- [31] 国敬, 范涛, 章回炫, 等. 高速低载波比下永磁同步电机电流环稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7336-7346.
GUO Jing, FAN Tao, ZHANG Huixuan, et al. Stability analysis of permanent magnet synchronous motor current loop control at high speed and low carrier ratio[J]. Proceedings of CSEE, 2019, 39(24): 7336-7346(in Chinese).
- [32] 顾聪. 高速永磁电动机驱动系统关键技术探究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
GU Cong. Research on the key technology of high-speed permanent magnet brushless motor drive system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020(in Chinese).
- [33] TANG Zhuangyao, LI Xiong, DUSMEZ S, et al. A new V/f-based sensorless MTPA control for IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4400-4415.
- [34] SILBER S, SLOUPENSKY J, DIRNBERGER P, et al. High-speed drive for textile rotor spinning applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2990-2997.
- [35] TOGASHI R, INOUE Y, MORIMOTO S, et al. Performance improvement of ultra-high-speed PMSM drive system based on DTC by using SiC inverter[C]// 2014 International Power Electronics Conference(IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). Hiroshima: IEEE, 2014: 356-362.
- [36] 赵皓宇. 电磁轴承高速电机转子系统分析及解耦控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
ZHAO Haoyu. Analysis and decoupling control for magnetic bearing high-speed motors rotor system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [37] 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): 1826-1838.
- [38] ZHOU Sizhan, LIU Jinjun, ZHOU Linyuan, et al. DQ current control of voltage source converters with a decoupling method based on preprocessed reference current feed-forward[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8904-8921.
- [39] 吴荒原, 王双红, 辜承林, 等. 内嵌式永磁同步电机改进型解耦控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 30-37.
WU Huangyuan, WANG Shuanghong, GU Chenglin, et al. An improved decoupling control strategy for the IPMSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 30-37(in Chinese).
- [40] 李春鹏, 贲洪奇, 刘博, 等. 采用扰动观测器的偏差解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5859-5868.
LI Chunpeng, BEN Hongqi, LIU Bo, et al. Deviation decouple control method based on disturbance observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5859-5868(in Chinese).
- [41] 刘程子. 适用于高速电机的混合型磁悬浮轴承设计及控制策略的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
LIU Chengzi. Design and research on control strategies of hybrid magnetic bearings system in high speed motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014(in Chinese).
- [42] 刘宇博, 王旭东, 周凯. 基于滑模观测器的永磁同步电机电流偏差解耦控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1642-1652.
LIU Yubo, WANG Xudong, ZHOU Kai. Current deviation decoupling control with a sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1642-1652(in Chinese).
- [43] 吴为, 丁信忠, 严彩忠. 基于复矢量的电流环解耦控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4184-4191.
WU Wei, DING Xinzong, YAN Caizhong. Research on control method of current loop decoupling based on complex vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4184-4191(in Chinese).
- [44] 伍小杰, 袁庆庆, 符晓, 等. 基于复矢量调节器的低开关频率同步电机控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 124-129.
WU Xiaojie, YUAN Qingqing, FU Xiao, et al. A novel complex state current controller for synchronous motor at very low switching frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 124-129(in Chinese).
- [45] BOSIO F D, DE S. RIBEIRO L A, FREIJEDO F D, et al. Discrete-time domain modeling of voltage source inverters in standalone applications: enhancement of regulators performance by means of smith predictor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8100-8114.
- [46] 陈卓易, 屈稳太. 基于 PID 型代价函数的永磁同步电机模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2971-2978.
CHEN Zhuoyi, QU Wentai. Model predictive current control for permanent magnet synchronous motors based on PID-type cost function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2971-2978(in Chinese).
- [47] 孙建业, 王志强, 谷鑫, 等. 高速低载波比下永磁同步电机预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3663-3672.

- SUN Jianye, WANG Zhiqiang, GU Xin, et al. Predictive current control of PMSM with high speed and low-frequency-ratio[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3663-3672(in Chinese).
- [48] LEE M, KONG K. Fourier-series-based phase delay compensation of Brushless DC motor systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 525-534.
- [49] YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A real-time computation method with dual sampling mode to improve the current control performance of the LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4563-4572.
- [50] LU Minghui, WANG Xiongfei, LOH P C, et al. Graphical evaluation of time-delay compensation techniques for digitally controlled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2601-2614.
- [51] BOLOGNANI S, CALLIGARO S, PETRELLA R. Design issues and estimation errors analysis of back-EMF-based position and speed observer for SPM synchronous motors[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 159-170.
- [52] 陈少华, 刘刚, 郑世强, 等. 高速永磁无刷直流电机无位置全转速控制策略[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(4): 105-114.
CHEN Shaohua, LIU Gang, ZHENG Shiqiang, et al. Sensorless full speed range control strategy of high-speed maglev brushless DC motor[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(4): 105-114(in Chinese).
- [53] 孙伟. 永磁同步电动机无位置传感器控制与高性能运行策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
SUN Wei. Study of PMSM position sensorless control and high-performance operation strategy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017(in Chinese).
- [54] 杨婷. 基于参数辨识的 MRAS 无位置传感器矢量控制系统[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
YANG Ting. PM synchronous motors sensorless vector control system based on MRAS with Parameters Identification[D]. Changsha: Hu'nan University, 2017(in Chinese).
- [55] 钟臻峰, 金孟加, 沈建新. 基于分段 PI 调节器的模型参考自适应永磁同步电动机全转速范围无传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1203-1211.
ZHONG Zhenfeng, JIN Mengjia, SHEN Jianxin. Full speed range sensorless control of permanent magnet synchronous motor with phased pi regulator-based model reference adaptive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1203-1211(in Chinese).
- [56] PAL A, DAS S, CHATTOPADHYAY A K. An improved rotor flux space vector based MRAS for field-oriented control of induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5131-5141.
- [57] 张洪帅, 王平, 韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1889-1896.
ZHANG Hongshuai, WANG Ping, HAN Bangcheng. Rotor position measurement for high-speed permanent magnet synchronous motors based on fuzzy PI MRAS[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1889-1896(in Chinese).
- [58] XU Wei, ALI M M, ELMORSHEDY M F, et al. One improved sliding mode DTC for linear induction machines based on linear metro[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4560-4571.
- [59] 张洪帅, 王平, 韩邦成, 等. 基于模糊滑模观测器的磁悬浮高速永磁同步电机转子位置检测方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 147-153.
ZHANG Hongshuai, WANG Ping, HAN Bangcheng, et al. Rotor position measuring method for magnetic levitation high speed PMSM based on fuzzy sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 147-153(in Chinese).
- [60] LIN T C, ZHU Ziqiang, LIU Jiaming. Improved rotor position estimation in sensorless-controlled permanent-magnet synchronous machines having asymmetric-EMF with harmonic compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6131-6139.
- [61] 蒯松岩, 李奎, 衡凤平, 等. 考虑互感影响的开关磁阻电机无位置传感器控制技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 178-186.
Kuai Songyan, Li Kui, Heng Fengping, et al. Position sensorless technology of switched reluctance motor considering mutual inductances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 178-186(in Chinese).
- [62] 邵杰. 开关磁阻电机无位置传感器控制关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
SHAO Jie. Research on key technologies for sensorless control of switched reluctance motor drives[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017(in Chinese).
- [63] SONG Xinda, HAN Bangcheng, WANG Kun. Sensorless drive of high-speed BLDC motors based on virtual third-harmonic back EMF and high-precision compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8787-8796.
- [64] ZHANG Guoqiang, WANG Gaolin, XU Dianguo, et al. Discrete-time low-frequency-ratio synchronous-frame full-order observer for position sensorless IPMSM drives[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(2): 870-879.

- [65] AWAN H A A, TUOVINEN T, SAARAKKALA S E, et al. Discrete-time observer design for sensorless synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 3968-3979.
- [66] YANG S C, CHEN Guanren. High-speed position-sensorless drive of permanent-magnet machine using discrete-time EMF estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4444-4453.
- [67] LIANG Donglai, LI Jian, QU Ronghai. Sensorless control of permanent magnet synchronous machine based on second-order sliding-mode observer with online resistance estimation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3672-3682.
- [68] 刘思豪. 高速永磁同步电机转子位置误差补偿策略探究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
LIU Sihao. Researches on rotor position error compensation strategy for high speed permanent magnet synchronous motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021(in Chinese).
- [69] MYNAR Z, VACLAVEK P, BLAHA P. Synchronous reluctance motor parameter and state estimation using extended Kalman filter and current derivative measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 1972-1981.
- [70] 尹忠刚, 肖鹭, 孙向东, 等. 基于粒子群优化的感应电机模糊扩展卡尔曼滤波器转速估计方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 55-65.
YIN Zhonggang, XIAO Lu, SUN Xiangdong, et al. A speed estimation method of fuzzy extended Kalman filter for induction motors based on particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 55-65(in Chinese).
- [71] 顾聪, 王晓琳, 邓智泉. 一种基于双重锁相环的高速永磁同步电机转子位置估计误差全补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 962-969.
GU Cong, WANG Xiaolin, DENG Zhiqian. A rotor position estimated error correction method for high-speed permanent magnet synchronous motor based on dual-phase-locked-loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 962-969(in Chinese).
- [72] SONG Xinda, HAN Bangcheng, ZHENG Shiqiang, et al. A novel sensorless rotor position detection method for high-speed surface PM motors in a wide speed range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7083-7093.
- [73] HAN Di, MORRIS C T, LEE E, et al. Comparison between output CM chokes for SiC drive operating at 20- and 200-kHz Switching frequencies[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2178-2188.
- [74] KUMAR K, SANTRA S B. Performance analysis of a three-phase propulsion inverter for electric vehicles using GaN semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6247-6257.
- [75] LI Chushan, LU Rui, LI Chengmin, et al. Space vector modulation for SiC and Si hybrid ANPC converter in medium-voltage high-speed drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3390-3401.
- [76] VELANDER E, BOHLIN G, SANDBERG A, et al. An ultralow loss inductorless dv/dt filter concept for medium-power voltage source motor drive converters with SiC devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6072-6081.
- [77] JIANG Yanmin, WU Weimin, HE Yuanbin, et al. New passive filter design method for overvoltage suppression and bearing currents mitigation in a long cable based PWM Inverter-Fed motor drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7882-7893.
- [78] MISHRA P, MAHESHWARI R. Design, analysis, and impacts of sinusoidal LC filter on pulsewidth modulated inverter fed-induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2678-2688.
- [79] WANG Tiejun, FANG Fang, WU Xusheng, et al. Novel filter for stator harmonic currents reduction in six-step converter fed multiphase induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 498-506.
- [80] 赵仁德, 赵斌, 徐海亮, 等. 带 LC 滤波器的永磁同步电机控制系统及策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 79-86.
ZHAO Rende, ZHAO Bin, XU Hailiang, et al. Research on control method of permanent magnet synchronous motor with LC filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 79-86(in Chinese).
- [81] PENG Hongwu, YUAN Zhao, ZHAO Xingchen, et al. Improved space vector modulation for neutral-point balancing control in hybrid-switch-based T-type neutral-point-clamped inverters with loss and common-mode voltage reduction[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(4): 328-338.
- [82] EWANCHUK J, SALMON J, KNIGHT A M. Performance of a high-speed motor drive system using a novel multilevel inverter topology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1706-1714.
- [83] WANG Kui, ZHENG Zedong, WEI Daobo, et al. Topology and capacitor voltage balancing control of a symmetrical hybrid nine-level inverter for high-speed motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5563-5572.

- [84] 赵星晨. 永磁同步电机的多电平驱动技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHAO Xingchen. Research on permanent magnetic synchronous motor driven by multi-level inverter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018(in Chinese).
- [85] WANG Xiaoguang, WANG Xiaoyuan, FU Tao, et al. Predictive instantaneous torque control for disc coreless permanent magnet synchronous motor with the current source chopper[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7100-7112.
- [86] CHENG Ruiqi, HE Yingjie, LEI Chao, et al. Research on realizing space vector equivalent modulation output by dual carrier modulation of current source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 8494-8505.
- [87] LI R T H, CHUNG H S H, CHAN T K M. An active modulation technique for single-phase grid-connected CSI[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1373-1382.
- [88] KOMURCUGIL H. Steady-state analysis and passivity-based control of single-phase PWM current-source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(3): 1026-1030.
- [89] WANG Weiqi, GAO Feng, YANG Yongheng, et al. An eight-switch five-level current source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8389-8404.
- [90] 王晓琳, 郭慧, 顾聪. 一种基于电流源逆变驱动的超高速永磁同步电机改进型控制策略[J]. 中国电机工程学

报, 2022, 42(7): 2733-2744.

WANG Xiaolin, GUO Hui, GU Cong. An improved control strategy for the Ultra High speed permanent magnet synchronous motor fed by the current source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2733-2744(in Chinese).



鲍旭聪

在线出版日期: 2021-11-12。

收稿日期: 2021-07-08。

作者简介:

鲍旭聪(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高速电机驱动技术、无轴承电机驱动系统, baoxc@nuaa.edu.cn;

*通信作者: 王晓琳(1976), 男, 教授, 主要研究方向为永磁电机、无轴承电机、高速电机及其控制, wangxl@nuaa.edu.cn;

彭旭衡(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超高速永磁同步电机驱动技术、大功率内置式永磁同步电机驱动技术, Shalom_pXH@nuaa.edu.cn;

严廷雄(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高速电机变换器调制技术、高速电机驱动技术, yantingxing@nuaa.edu.cn;

高起兴(1992), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高速永磁电机, gaoqixing@nuaa.edu.cn。

(编辑 朱腾翌)

Review of Key Technologies of High-speed Motor Drive

BAO Xucong, WANG Xiaolin*, PENG Xuheng, YAN Tingxiong, GAO Qixing
 (Key Laboratory of More Electrical System (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics))

KEY WORDS: high-speed motor; driving technology; control strategy; rotor position estimation; power topology

Due to its obvious advantages of high power density, small volume and weight and high working efficiency, high speed motor has been paid more and more attention. An efficient and stable driving system is the key to give full play to the excellent performance of high-speed motor. This paper mainly analyzed the difficulties of high-speed motor driving technology from the aspects of control strategy, angle estimation and power topology, and summarized the current research results domestic and overseas. Finally, the high speed motor drive technology and its development trend are summarized and prospected.

The design of high-speed motor drive system requires comprehensive consideration of many factors, mainly including current loop coupling, system delay, parameter error, current ripple suppression and other difficulties. It is a highly complex process, which puts forward high requirements on control strategy, angle estimation accuracy and power topology design, as shown in Fig. 1.

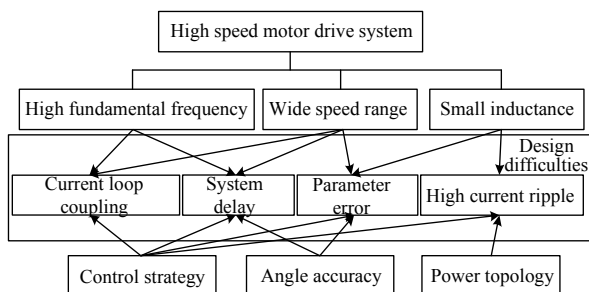


Fig. 1 Difficulties and schemes of high speed motor drive system design

This paper summarized the current research results of key technologies of high-speed motors from three aspects: control strategy, angle estimation and power topology. The conclusions are as follows:

1) Due to the characteristics of high fundamental frequency and low carrier frequency ratio, the coupling and delay of high speed motor drive system are particularly prominent. In order to solve the coupling problem, the decoupling control technology based on disturbance compensation and complex vector regulator is the research hotspot. Model-based and model-independent delay compensation strategies are commonly used for delay problems.

2) Angle estimation scheme based on sensorless is usually adopted in high-speed motor drive system, mainly including inverse electro- motive force estimation method in $\alpha\beta$ coordinate system and sensorless angle estimation method in dq coordinate system. In order to further improve the rotor position estimation accuracy of high-speed motors, relevant scholars have analyzed the error generation mechanism in the position estimation process in detail and put forward compensation strategies. At present, the research focuses on the position error compensation strategy based on extended Kalman filter and the position error compensation strategy based on phase-locked loop.

3) The characteristics of low inductance and high fundamental frequency of high-speed motor lead to large current ripple of its drive system, which will cause problems such as high system loss and high operating noise. To solve the above problems, improving the switching frequency and external filtering are the most direct solutions, but the application scope is limited by problems such as extra loss and huge system volume. At present, the current ripple suppression of high-speed motor drive system is mainly realized from the perspective of power topology optimization combined with the improved control algorithm.