

开关磁阻电机无位置传感器技术的研究现状和发展趋势

邓智泉 蔡 骏

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:无位置传感器技术是开关磁阻电机(Switched reluctance motor, SRM)系统研究的一个重要方向。该技术的研究可以进一步提高SRM的系统集成度,增强系统的高速性和环境适应性,充分发挥SRM的强容错能力和高可靠性。本文针对启动和低速运行以及中、高速运行等不同运行状态对目前国内外所研究的无位置传感器方法进行了分类讨论,并评述各种方法的优缺点;最后对该技术所亟需解决的关键技术和未来发展趋势进行了分析和展望,以期对未来开关磁阻电机系统的深入研究和拓宽应用提供参考。

关键词:开关磁阻电机;无位置传感器技术;关键技术;发展趋势

中图分类号:TM352

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)05-0611-10

Research Status and Development Trends of Sensorless Techniques of Switched Reluctance Motor

Deng Zhiquan, Cai Jun

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The sensorless technique is an important research branch in switched reluctance motor (SRM) drives system. The research of the high performance sensorless technique can further improve the system integration, enhance the high speed capability and harsh environment adaptability, and make full use of the strong fault-tolerant capability and high reliability of SRM. Aiming at the starting-low speed operation, and the medium-high speed operation conditions, this paper classifies and discusses the research status of the sensorless schemes, and reviews their advantages and disadvantages. Finally, the key technologies and future development trends of the sensorless technique are analyzed, which will provide important reference for the in-depth study and broadening the application of the SRM drive system.

Key words: switched reluctance motor; sensorless technique; key technologies; development trends

开关磁阻电机(Switched reluctance motor, SRM)采用双凸极结构,定子上绕有集中式绕组,转子无永磁材料和绕组,因而具备结构简单、坚固等特点,适于高速运行和恶劣的工作环境。同时,SRM优异的容错运行能力也拓宽了其应用领域,在航空航天、电动汽车、船舶、分布式电源系统以及精密加工、纺织机械、飞轮储能、半导体加工等诸多场合具有良好的应用特色,尤其在一些诸如航空发动机、核电站等需要工作在高温、高速、高污染、强

电磁干扰和核辐射等极端条件下的应用场合具有独特的应用优势。然而,与经典的异步电机不同,SRM则必须借助转子位置信息才能可靠运行。但传统的光电式、电磁式以及磁敏式等位置或转速传感器的引入不仅会增加系统的成本和复杂度,而且降低了系统的可靠性和环境适应性,从而限制了SRM的应用范围。因此,无位置传感器技术的研究可以进一步提高SRM的系统集成度,增强系统的高速性和适应性,充分发挥SRM的强容错能力和

基金项目:国家自然科学基金(51277094)资助项目。

修订日期:2012-07-05

通讯作者:邓智泉,男,教授,博士生导师,E-mail:dzq@nuaa.edu.cn。

高可靠性,为其在高速、高温、核辐射等极端工况下的机电能量转换领域中的应用奠定基础。

1 开关磁阻电机无位置传感器技术研究概况

无位置传感器技术一直是开关磁阻电机研究中的热点问题,目前主要的国外研究机构有美国德克萨斯大学、艾克朗大学、俄亥俄州立大学、威斯康辛麦迪逊大学和弗吉尼亚理工大学,英国的剑桥大学和利兹大学,日本的明治大学、东京理工学院,新加坡国立大学,印度科学院;国内主要研究机构有浙江大学,天津大学,西北工业大学和南京航空航天大学等;另外,一些著名的公司如GE、Emerson、Switched Reluctance Drives Ltd 等也都开展了相关的研究。但目前的研究仍处于原理验证阶段,并没有相关的产品问世。

SRM 由于其特殊的双凸极结构、磁路高度饱和以及涡流和磁滞效应明显等特点,使得其电磁特性与绕组电流、转子位置角呈高度非线性关系。而无位置传感器技术是利用电机的相电流、相电压等可测电信号,来估计磁链、自感、增量电感以及反电势等电磁特性参数,并利用这些电磁特性参数与位置角、相电流之间的非线性关系来间接获取转子位置信息,从而实现转子位置估计和无位置传感器运行。关于SRM 无位置传感器技术的研究自20世纪80年代中期就有持续的相关报道。自1985年由Acarney 教授等人提出“相电流波形法”以来,SRM 无位置传感器技术就开始引起高度重视,诸如调制解调法、高频脉冲注入法、互感检测法、磁链/电流法、电流梯度法、电感模型法、反电势估计法、智能拟合法以及观测器系列算法等多种位置估计算法被相继提出。从现有文献来看,目前所提出的各种算法都各有特色,但尚未建立一套完整的适合全转速范围的无位置传感器技术。

1.1 启动和低速运行的无位置传感器技术

开关磁阻电机的无位置传感器初始位置检测、无反转启动和低速运行控制一直是无位置传感器技术研究的一个难点问题。就SRM 静止启动和低速运行而言,目前主要的无位置传感器方法有相电流波形法、调制解调法和高频脉冲注入法。

导通相电流波形法是由英国剑桥大学Acarney 教授等于1985年提出的^[1],该方法的基本思想是在电流斩波模式下,增量电感取决于电流上升和下降时间,根据增量电感与转子位置的关系可以估计转子位置。该方法直接忽略了运动电动势和绕组

电阻压降的影响,随着转速的升高,反电势的影响趋于明显使得电流无法斩波,因此该方法仅适合于低速运行。

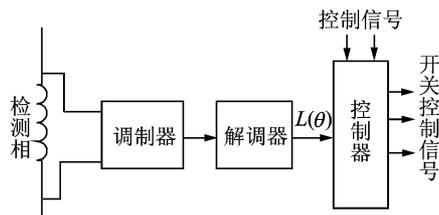


图1 调制法原理图

调制解调法最早由美国德克萨斯大学Ehsani 教授等提出^[2-4],通过向非导通相外加正弦激励,采用频率调制(Frequency modulation, FM)、相位调制(Phase modulation, PM)以及幅度调制(Amplitude modulation, AM)等方法可以间接地获取转子位置信息,其原理框图如图1所示。这类方法都需要外加激励源、调制解调电路和信号切换电路,系统电路较为复杂,检测信号易受干扰,因此该方法的检测精度和适用范围有限。

与调制解调法不同,高频脉冲注入法无需外加激励源,而直接利用功率变换器给非导通相注入高频检测脉冲。由于检测脉冲的响应电流幅值很小,在转速很低时运动电动势、电磁饱和效应以及绕组等效电阻压降均可忽略。此时,当母线电压 U_{dc} 和检测脉冲频率给定时,非导通相的脉冲响应电流幅值与相电感呈反比关系。

基于上述特点,近十年来,国内外学者利用脉冲注入法对SRM 的无位置传感器静止启动进行了相关的研究。美国德克萨斯大学Gao 等于2001年提出了一种启动相估计方法^[5],该方法通过同时给各相注入短时脉冲,如图2所示,根据响应电流与相电感之间的反比关系,比较响应电流的大小即可判断转子所处位置区域,通过选择处于电感上升区的相作为开通相即可实现电机的初始启动相估计。该方法实施简单便于实现,但它无法精确确定转子初始位置,且必须结合其他低速运行算法才能实现电机的连续启动运行。

文献[6]在文献[5]方法的基础上提出了一种建立响应电流峰值与转子位置的关系的3次样条模型的方法。在固定母线电压的模式下,给各相同时注入高频检测脉冲,并测量在不同转子位置下的脉冲电流峰值可以得到如图3所示的转子位置与峰值电流的关系图。利用3次样条函数可以实现对上述关系的拟合,从而利用检测的响应电流峰值估计出转子初始位置,与此同时,也可以通过比较电

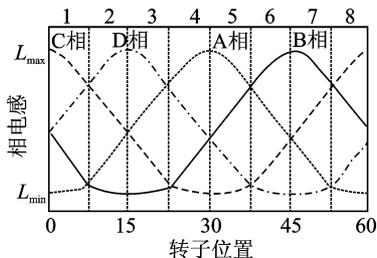


图2 电感分区示意图

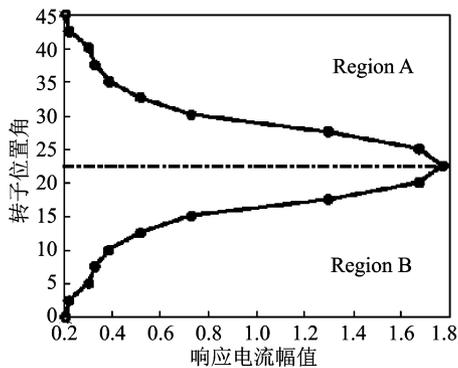


图3 转子位置与响应电流的关系

流大小估计出初始导通相。

该方法可以实现电机的初始定位和初始导通相估计,但是该方法需要借助一定的初始参数测量,同时还需建立转子位置与峰值电流的数学模型,因此处理过程相对复杂,另外,该方法也必须结合其他低速运行算法才能实现电机的连续启动运行。文献[7]在文献[6]的基础上对峰值电流法在初始位置检测中的应用进行了研究,并对该方法的鲁棒性进行了分析。

文献[8]则利用一阶傅里叶级数来拟合不饱和电感曲线,并利用电压方程计算出的非导通相电感值来解算转子位置信息。这种方法由于忽略了运动反电势和绕组电阻压降的影响,因此只能适合转速很低的区域。

日本学者 Bamba 在文献[9]提出了一种采用电感向量与正交分解结合的方法,该方法利用电压方程估计三相电感,通过正交分解得到位置角的正切函数值,从而求反正切得到转子初始位置角。该方法实现简单,但是该文献没有讨论反正切的值域问题,也没有研究该方法在启动后的运行性能。

文献[10]提出了一种利用到达检测电流给定阈值的时间来判断最佳位置估计相的方法,从而在确定的估计相实现位置角的计算。该方法实现了静止和有初始转动的位置估计,可以实现无反转启动,方法简单易于实现,但是该文献并没有对启动后的运行控制进行研究。

文献[11~12]研究了一种基于不对称半桥的上桥臂开关管驱动的自举电路的初始位置估计方法。如图4所示,该方法通过给自举电路中的电容充电,向各相绕组中注入脉冲电流,通过测量自举电路中电容充电到达最大电流的时间来计算相电感,根据电感分区逻辑判断转子所在位置区间,同时根据电感曲线几何关系确定转子初始位置。该方法可以确定电机静止时初始导通相和转子初始位置,但该文献并没有对电机的启动运行控制进行拓展研究。

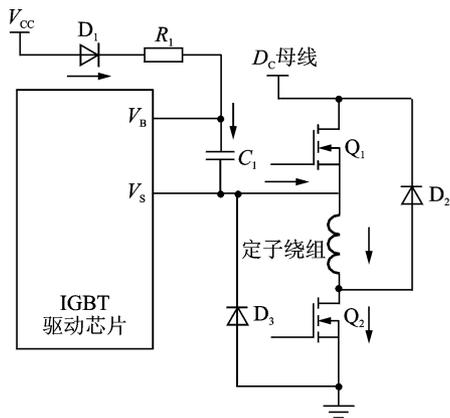


图4 自举电路

文献[13]提出了一种新型的相电感分区方法,该方法通过相电感分区可以实现初始导通相的估计,同时可以确定初始位置的估计相。利用傅里叶级数拟合电感曲线,在所选择的位置估计相可以求解出转子初始位置。该方法可以较为精确地实现初始定位,但仍需要预知电机的电感特性曲线。文献[14]则提出了一种基于相电感矢量法和相电感分区法结合的无位置传感器方法,该方法通过计算相电流的上升和下降斜率差值来估计相电感,间接消除了运动反电势的影响,拓宽了方法适应的转速范围。该方法实现了精确初始定位以及空载、轻载模式下的启动控制,具有良好的调速和抗扰动能力,但文献中没有对重载运行模式进行深入分析。

文献[15]提出了一种两相电流比较法的启动方法,这种方法无需预知电感信息,也无需任何建模和解算过程,因此易于实现。但是,该方法没有考虑换相信号估计逻辑在相电流续流区间的存在误区问题,因此在实际运行中容易出现驱动信号的混乱,严重时容易导致电机堵转。此外,该方法的原理决定了其只能工作在单相轮流导通模式,因此无法实现开通、关断角的调节。文献[16]提出了一种非导通相电流双阈值启动方法,该方法可以通过设置

不同的电流阈值来实现开通关断角的可调,从而满足负载启动要求。但是,该方法直接忽略了运动反电势和绕组等效压降的影响。因此,它只能适合转速很低的范围。

上述研究结果表明,对于SRM初始位置估计和启动控制而言,基于高频脉冲注入的系列算法一直是国内外学者最为关注的方法。其关键的优点在于,高频脉冲的检测电流很小,不会引起绕组电感的饱和,因此可基于电感的不饱和特性来实现位置信号的解码或初始导通相的估计。而对于启动后低速运行控制而言,导通相电流通常较大,尤其在电机重载运行时,不能直接忽略磁路饱和效应,使得导通相的电磁特性较为复杂。此外,由于低速时导通相磁链或电感的计算精度较差,都会使得采用导通相电信号来估计转子位置的方法实现起来相对较为困难。为解决这一问题,通常采用非导通相注入检测脉冲的方法。但传统的方法中由于直接忽略了运动反电势和绕组等效压降的影响,其检测精度通常会受到转速的限制,这不利于低速算法与中高速算法之间的衔接。因此,针对这些方法在应用上的局限,还需做进一步的深入研究。

1.2 中、高速运行的无位置传感器技术

中、高速区域的无位置传感器技术的研究一直是国内外学者关注的焦点。由于在中、高速运行时,导通相电流将占据整个电周期的大部分区域,从而使得非导通相检测脉冲注入的区间变得非常有限,因此在中、高速区域,一般不采用脉冲注入法。从目前的文献可以看出,对于中、高速运行区域,磁链/电流法、电感模型法、电流梯度法、观测器法等无位置传感器方法一直是国内外学者最为关注的方法^[8,17-50]。其中,磁链/电流法和电感模型法的研究最为广泛,如图5所示,它们的基本思想都是基于电机的相磁链或相电感与相电流、转子位置角呈非线性关系的特点,利用检测到导通相的相电流和相电压通过插值查表、数学模型或智能逼近等方法来间接估计转子位置信息或换相信号,从而实现无位

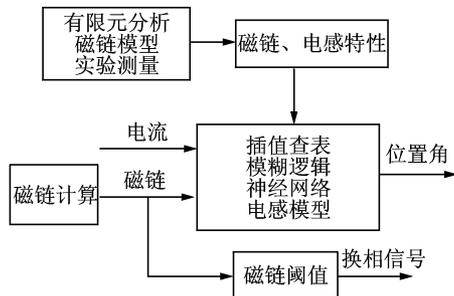


图5 基于磁链和电感的位置估计方法原理框图

置传感器运行控制。

磁链/电流法最早由Lyons等人在1991年提出^[19],该方法将磁链-电流-位置角数据以三维表的形式存储,通过实时估计绕组磁链与相电流一起查表得到转子位置信息。另一方面,也可以利用绕组电流查表得到换相位置下对应的参考磁链,比较实时磁链与换相参考磁链的大小即可判断换相位置。这种方法虽然不需要额外添加硬件资源,但是需要通过复杂的有限元计算或离线测量的方法来获取磁链特性曲线,并建立复杂的三维表格,这些数据对于不同的电机而言无法通用,因此算法的可移植性较差。此外,由于存储复杂的三维表,占用软硬件资源较大,计算时间长,仍会限制位置估计的转速适应范围。

根据磁链/电流法的基本思想,利用磁链特性来获取转子位置信号的问题,可以等效于一个双输入单输出的非线性逼近问题,而模糊逻辑和神经网络等智能拟合算法具备优良的非线性逼近能力,为解决这一问题提供了一个新的方向。近十年来,许多学者相继对模糊逻辑^[20-23]、自适应神经模糊推理系统(Adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)^[24-25]以及反向传播神经网络(Back-propagation neural network, BPNN)、径向基神经网络(Radial basis function neural network, RBFNN)神经等^[26-32]在SRM转子位置估计中的应用进行了可行性研究。这几种经典的智能拟合算法的拓扑如图6所示,可见利用检测的电流和估计的磁链通过训练好的模糊规则或神经网络模型即可估计出转子位置信息。

Cheok和Ertugrul于2000年最先提出了将模糊逻辑应用于SRM无位置传感器的思想^[20-21]。这种方法采用模糊模型取代原来的三维表格,大大释放了表格存储资源,但是该模糊模型仍需要复杂的离线训练过程和繁杂的模糊规则,在很大程度上限制了该方法的实用性。2005年Cheok等又提出一种基于ANFIS的位置估计算法^[25],该方法较大程度地简化模糊规则和训练过程。与此同时,还提出了一种绕组电阻在线估计策略,改善了磁链估计的精度,从而有效提高了位置估计的精度。Xu Longya教授等研究了一种将通用非线性磁链模型与模糊算法结合的位置估计策略^[23],分别在一台6/4结构和12/8结构高速电机中进行了实验,研究表明这种方法具有良好的高速性能。2002年,Mese等人将BPNN神经网络应用于SRM转子位置估

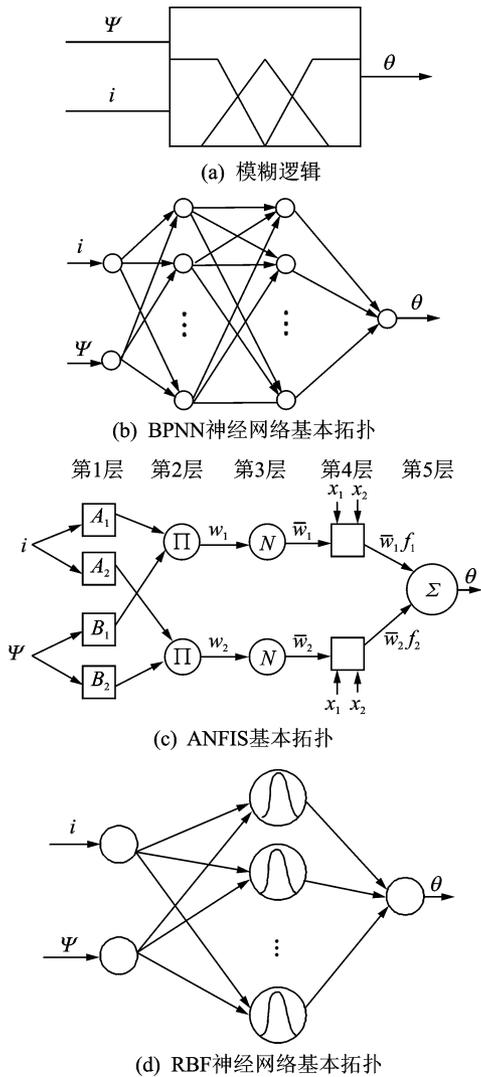


图6 几种经典的智能拟事算法的拓扑

计^[27],在该方法中使用了两个神经网络,运算量较大。2008年,Hudson等设计了一种最小神经网络用于单相开关磁阻电机的位置估计^[28],该网络结构相对简单,无隐层单元,因此进一步简化了运算过程。夏长亮教授等对BPNN,RBF以及支持向量机等神经网络在无位置传感器位置估计中应用也进行了相关的可行性研究^[31-32]。从这些研究可以发现,智能算法的引入可以有效解决SRM非线性建模问题,但是模糊规则的准确建立要受到实际经验的限制,而神经网络则需要大量训练数据和训练时间,因此在电机高速运行时算法的实时控制性能有待更深入的探索。

电磁特性曲线的实验测量通常需要采用分度头、分度盘等大型机械装置,这些设备昂贵笨重,安装精度要求高,使得测试平台的搭建存在困难,从而很大程度上限制了查表法和智能拟合算法的通用性。Panda等人针对该问题提出了一种参考位置

磁链曲线测量的方法^[33]。即开通任意一相,将转子拉至对齐位置,之后同时开通与之相邻的两相,根据对称性,这两相产生的合成转矩为零,转子将不产生转动,从而利用磁链积分可以计算出该参考位置的磁链电流曲线。将该曲线存储为二维表格,通过比较实时磁链与参考磁链的大小,可以辨识出该参考位置信息。华中科技大学邱亦慧等也提出了一种与之类似的简化磁链法^[34],该方法仅需测量并存储定、转子极对齐位置的磁链电流曲线,将当前相电流查表得到的对齐位置磁链值乘以一个小于1的系数K便可以得到换相位置的参考磁链值,通过比较实时磁链与参考磁链的大小就能得到换相信号。此处的K值可以灵活调整,从而可以实现换相位置的调节。但是该方法只能工作在单相轮流导通模式,因此无法满足系统高性能调速的要求。为解决这一问题,浙江大学郑洪涛博士在简化磁链的基础上提出了一种开通、关断角可调的无位置传感器控制方法^[35]。该方法将测量的对齐位置的磁链电流曲线进行多项式函数拟合,通过调节第*i*+1相的开通参考磁链系数和第*i*相的关断参考磁链系数,采用与简化磁链法类似的方法可以分别得到下一相的开通磁链阈值和当前相的关断磁链阈值,从而与当前相的实际磁链进行比较可以得到当前相的关断信号和下一相的开通信号。这种双阈值策略理论上拓宽了简化磁链法的应用范围,但是由于该方法中对参考磁链系数的选择并不明确,因此仍会影响位置检测的精度。

为避免查表等内存占用环节,美国德克萨斯大学Suresh等最早提出采用二阶傅里叶级数来拟合相电感、相电流与转子位置之间的非线性函数关系^[36],该模型只需利用对齐位置、不对齐位置及中间位置3条电感曲线,因此建模相对简单。将该电感模型代入相电压方程,通过检测电压、电流,计算出电感实际值,采用二分法即可解算出转子位置信息。GAO,Fahimi等在后续的研究中也多次利用到该电感模型^[37-38]。该方法无需外加硬件,也无需建立复杂表格,但为提高模型精度,有必要采用更高阶的傅里叶级数拟合,这同时也会使位置解算变得更加复杂。文献^[39~40]提出了一种基于电感动态阈值SRM无位置传感器控制方法。该方法无需从电压方程中解算转子位置,而直接可以估计出各相驱动信号,因此有效提高了算法的运行速度和精度。

为实现电机高速运行,1998年,Gallegos-Lopez等人提出了一种基于相电流梯度法的SRM

无位置传感器技术^[41]。该方法通过检测相电流梯度的过零信号来估计定转子齿极开始重合的位置点信号。这种方法的优点在于无需预知电机的电磁特性数据和精确SRM数学模型。此外,该方法采用一种单周期单特殊点检测的策略,提高了位置估计的快速性,适合用于高速运行时的位置估计。2010年,纽卡斯尔大学 Acarnley 教授等将这一方法应用于高速SRM的位置估计,通过仿真分析了该方法对母线电压、转速以及开通角的影响^[42]。研究表明,该方法必须满足“导通相电感上升区的反电势大于绕组两端电压”这一条件,且不适合于电机的启动运行控制,同时由于增加了一些信号调理电路,增加了系统的复杂度。文献^[43]也对单周期单特殊点的估计方法进行了研究,分别提出了基于电感斜率检测的系列算法,这些算法可以实现定、转子对齐位置的估计,适合高速时的无位置传感器控制。

除上述方法之外,近年来,状态观测器方法在SRM转子位置估计中也得到了广泛的研究。状态观测器法,需建立由SRM固有的一些物理参数所决定的模型方程和特征状态观测器,通过检测电机端口相电压信号和相电流信号来估计转子位置。传统的Luneberger观测器方法计算量较大^[44],而且线性的Luneberger观测器并没有考虑磁路饱和的影响,对参数变化比较敏感,在SRM重载运行时,其位置估计的性能和鲁棒性较差。考虑到SRM强非线性、强耦合的系统特点,一系列鲁棒性好、实时性强的滑模观测器、自适应观测器、卡尔曼滤波器得到了研究^[8,45-50]。这些方法考虑了SRM的非线性特点,可实现连续的位置估计,同时对相电阻等参数的变化具备较好的适应性。但这些方法依赖于较为复杂的数学模型,通常需要进行复杂的数学计算或查表运算,因此算法通常比较复杂,对处理器的性能要求很高,其通用性和可移植性均有待提高。

2 开关磁阻电机无位置传感器控制的关键技术

从算法研发的角度来看,SRM无位置传感器技术走向实用化的前提便是要实现全速范围的无位置传感器技术。但是,从目前的研究现状可以看出,至今位置尚未研究出一种能够完全涵盖整个转速范围的无位置传感器控制方法,而对于高速开关磁阻电机而言,全速范围的无位置传感器技术更是一大挑战。因此,目前对无位置传感器技术的研究

仍需结合SRM不同运行状态的特点有针对性地研究较为适合的位置检测方案。

2.1 针对SRM无位置传感器启动技术

就SRM无位置传感器启动技术而言,为满足电机高性能启动的要求,实现与高速算法之间平滑切换,需要重点解决关键技术。

(1) 静止和带初始转速时的初始定位技术:实现电机静止状态时的精确初始定位,可以确保电机的无反转、无磁滞启动,这对于诸如伺服系统等一些控制精度要求很高的应用场合而言是非常关键的。而对于诸如启动/发电机、车用驱动电机等需要频繁启动和制动的应用场合,电机通常需要在惯性运行状态下重新启动,因此仍需精确估计出电机实时的位置信息,从而避免启动迟滞,确保电机稳定启动。

(2) 带载启动技术:实现无反转、无磁滞启动,且具备带载启动能力,这是电机高性能启动的基本要求。

针对静止或带初始转速这两种初始状态,实现初始定位最为实用的方法是基于高频注入的系列算法。由于在这两种初始状态下,电机各相均无驱动信号,此时可以在整个周期内持续注入高频检测脉冲,从而利用不饱和和电感特性通过数学模型、查表、矢量坐标分解、分区比较等手段来实现转子位置的解码,因此实现起来非常方便。

对于启动后低速运行状态,尤其是在电机负载较大时,由于导通相电流大,如果利用导通相电磁信号来估计位置或驱动信号,则需要考虑磁路饱和和因素的影响,这使得算法变得复杂化。因此,利用非导通相脉冲注入法可巧妙地利用非导通相电感不饱和的特点,从而较大程度地简化启动算法。但是,非导通相注入高频脉冲则会带来诸如续流时间延长、负转矩、开关损耗等问题,因此有必要研究脉冲注入优化策略,尽量减小非导通相中注入脉冲的区域,避免关断续流区域和电感最小区域的脉冲注入。此外,为拓宽启动算法的转速适应范围,还有必要研究相关的算法来计及运动反电势对位置估计的影响。

2.2 针对中、高速运行时的SRM无位置传感器技术

就中、高速运行而言,如何利用磁链和电感等电磁特性来实现转子位置信息的精确解码,仍然是无位置传感器技术研究的关键。针对这一问题,有如下两类方法值得深入的研究。

(1) 基于电磁特性模型的无位置传感器技术:

考虑磁链/电感等电磁特性与相电流和转子位置存在高度非线性的特点,要实现位置信息的解码,首先需要解决的关键问题便是电磁特性的非线性建模问题。理论上可以建立关于磁链/电流/位置角三者之间的数学模型,但是要满足数学模型精度的要求,所建立的数学模型通常较为复杂。神经网络、模糊逻辑等智能控制算法以其强大的非线性逼近能力和自适应能力,为解决非线性建模问题奠定了重要的理论基础。但限制这些方法应用的主要问题在于运算量庞大,很难满足电机实时控制的要求,尤其是高速电机。但是,随着电子器件的不断更新以及电力电子技术、信号处理技术和先进控制理论的迅速发展,采用更强功能的处理器或设计智能算法的专用芯片,可以为智能算法的快速实现提供强有力的保证,这对于进一步提高位置估计的精度和智能化,无疑具有重要的意义。

(2) 摆脱电磁特性模型的无位置传感器技术:根据SRM本身的几何结构和电气特性,不对齐位置、对齐位置、定转子开始重合位置均可视为SRM特殊位置点,这些位置点不随转速的变化而变化。那么通过对这些特殊位置点的监测,可以估计出电机的转速和位置信息。这种类型的方法在每个电周期内只存在一个位置点的检测,而且有效避免了直接利用电磁特性曲线,避开了查表、数学模型、智能拟合等复杂存储和计算环节,为软件运行的快速性和实时性提供了前提。这无疑是高速SRM的无位置传感器技术另一个重要研究思路,同时也为无位置传感器技术的低成本实现提供了方向。

2.3 SRM全速范围无位置传感器技术

由于不同的位置估计算法都具有各自的转速适应范围,那么无位置传感器技术要覆盖整个速度范围,通常需要使用两种或两种以上的算法,但这并不意味着算法之间可以随意组合。就SRM全速范围无位置传感器技术的实现而言,还必须深入研究低速和高速算法之间的软切换技术,尽量避免在临界区域时位置检测算法之间的振荡,以提高无位置传感器控制的鲁棒性和系统的稳定性,满足系统的启动、低速到高速整个转速范围内的无位置传感器控制要求。

3 无位置传感器技术的其他研究方向和发展趋势

为进一步完善开关磁阻电机的无位置传感器技术,推动该技术的实用化进程,还有一些重要的研究方向值得深入探索和研究。

3.1 无位置传感器技术与SRM的性能优化控制技术的结合

无位置传感器技术不是孤立的算法,它可以与电机的优化控制技术相结合,以满足电机调速性能要求。通常,开关磁阻电机的主要可调参数是电流斩波限、开通角以及关断角,这些参数的优化有助于电机性能的提升。因此,无位置传感器技术的研究与转矩脉动抑制、减振降噪等性能优化控制技术的结合,也将是无位置传感器技术未来发展的方向,也是进一步拓宽开关磁阻电机应用领域、增强其在驱动电机中的竞争力的关键。

3.2 无位置传感器容错控制技术

由于电机加工、装配以及材料老化等因素,通常会使得各相电感不完全对称,此时则需要考虑电感不对称的影响。对于电感模型法、查表法以及神经网络、模糊控制等智能控制法都需要根据各相的电磁特性参数进行模型修正,以满足实际运行的要求。

此外,为充分发挥SRM的故障容错能力,有必要结合SRM的容错控制方法来研究具备容错能力的无位置传感器技术。对于SRM本身的故障类型而言,绕组和功率变换器的开路、短路故障会影响位置估计算法的实施,此外电流、电压传感器的失效则同样会影响位置估计。因此,针对这些主要故障因素来研究具备容错能力的无位置传感器技术有助于提高SRM电机的生命力,拓宽SRM电机的应用范围。

3.3 无位置传感器技术与位置传感器的组合应用

对于一些系统可靠性要求极高的应用场合,如航空启动发电机,位置传感器通常需要进行多重冗余备份,并实现故障切换,这无疑会增加系统体积和成本。如果采用位置传感器与无位置传感器技术的双重备份,那么将有助于降低系统成本。因此,有必要研究SRM运行过程中无位置传感器技术与位置传感器检测之间的相互切换技术。

3.4 专用集成电路的设计和应用

目前,SRM的数字控制通常采用通用型数字信息处理器(Digital signal processor, DSP)或单片机来实现,通过软件程序来完成位置估计和电机控制算法等任务。但DSP中各程序是串行执行的,各种资源和功能容易相互影响,通过软件实现位置信号估计将占用较大的资源和时间,而与此同时要确保电机控制算法的实时性和准确性将存在较大的难度。尤其在SRM高速、超高速运行时,即使在有位置传感器的情况下,位置信号的解算和处理仍

是一个难题。

专用集成电路可以针对特定的应用而进行特定的设计,针对不同的功能需求设计相互独立的控制模块,并使之能并行运行,这样可以较好地满足位置估计、电机控制等功能的快速性和精确性要求,同时还可以满足各自所需的控制资源要求。多功能、高可靠性、高集成度的专用控制电路的开发将进一步推动无位置传感器技术SRM的实用化进程。

3.5 特殊结构的开关磁阻电机的无位置传感器技术

SRM无位置传感器技术的研究对象通常是普通结构的开关磁阻电机。而目前很多学者已经开始对一系列新结构SRM或功能与原理类似SRM的新型电机进行研究,如无轴承SRM,新齿极结构SRM,分段转子SRM,模块化定子SRM以及双凸极电机,开关磁链电机等。这些电机都存在与普通SRM同样的位置检测问题,因此针对这些新型电机研究其相适合的无位置控制策略也是一个值得研究的方向。另外,针对不同的功能要求,开关磁阻电机可以采用不同结构的功率变换器拓扑,因此不同的控制模式下的位置估计策略则需要进行相应调整和改进,这也是一个值得注意的研究问题。

4 结束语

取代位置传感器,研究低成本、高可靠性、通用性强的无位置传感器技术具有重要的研究和应用价值。本文从传统SRM无位置传感器技术的基本理论、分类以及各种现有算法的优缺点和适用范围等方面深入地评述了国内外研究现状及其发展方向,并且从应用对象、应用场合以及算法本身等各方面探讨了无位置传感器控制需要解决的关键技术,以期开关磁阻电机无位置传感器技术的深入研究提供有价值的参考。

参考文献:

[1] Acarnley P P, Hill R J, Hooper C W. Detection of rotor position in stepping and switched motors by monitoring of current waveforms[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1985, 32(3): 215-222.

[2] Ehsani M, Husain I, Kulkarni A B. Elimination of discrete position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1992, 28(1): 128-135.

[3] Ehsani M, Husain I, Mahajan S, et al. New modulation techniques for rotor position sensing in

switched reluctance motors[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1994, 30(1): 85-91.

- [4] Suresh G, Fahimi B, Rahman K M, et al. Analysis of amplitude modulation methods for sensorless SRM drives[C]//Proc IEEE IECON'98. Aachen: IEEE, 1998: 917-922.
- [5] Gao H, Salmasi F R, Ehsani M. Sensorless control of SRM at standstill[C]//Proc IEEE APEC'00. Anaheim CA: IEEE, 2000: 850-856.
- [6] Trakrancharoungsook K, Kittiratsatcha S. Position estimation technique of a switched reluctance motor at standstill[C]//Proc PCCON'07. Nagoya, Japan: [s. n.], 2007: 264-270.
- [7] 刘卫国, 宋受俊, Sweafer W. 无位置传感器开关磁阻电机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 91-97.
Liu Weiguo, Song Shoujun, Sweafer W. Initial position estimation of sensorless switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24): 91-97.
- [8] Khalil A, Underwood S, Husain I, et al. Four quadrant pulse injection and sliding-mode-observer-based sensorless operation of a switched reluctance machine over entire speed range including zero speed[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2007, 43(3): 714-723.
- [9] Bamba T, Komatsuzaki A, Miki I. Estimation of rotor position for switched reluctance motor at standstill[C]//Proc PCCON'07. Nagoya, Japan: [s. n.], 2007: 259-263.
- [10] Krishnamurthy M, Edrington C C, Fahimi B. Prediction of rotor position at standstill and rotating shaft conditions in switched reluctance machines[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2006, 21(1): 225-233.
- [11] Shen L, Wu J H, Yang S Y. Initial position estimation in SRM using bootstrap circuit without predefined inductance parameters[J]. IEEE Trans Power Electron, 2011, 26(9): 2449-2456.
- [12] 沈磊, 吴建华, 杨仕友. 基于自举电路的开关磁阻电机初始位置估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 98-102.
Shen Lei, Wu Jianhua, Yang Shiyu. A novel estimation method for initial position of switched reluctance motor based on bootstrap circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 98-102.
- [13] 蔡骏, 邓智泉. 一种开关磁阻电机无位置传感器初始定位和起动方法[P]. 中国: ZL 201010238748. 7, 2010.
- [14] Cai J, Deng Z Q. Sensorless control of switched re-

- luctance motor based on phase inductance vectors [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, 27(7): 3410-3423.
- [15] 李景男,王旭东. 基于两相脉冲激励的开关磁阻电动机的无位置传感器转子位置检测[J]. *电机与控制学报*, 2002, 6(1): 6-9.
- Li Jingnan, Wang Xudong. Sensorless rotor position detection of SRM based on voltage pulses to two phases [J]. *Electric Machine and Control*, 2002, 6(1): 6-9.
- [16] Pasquesoone G, Mikail R, Husain I. Position estimation at starting and lower speed in three-phase switched reluctance machine using pulse injection and two thresholds [J]. *IEEE Trans Ind Appl*, 2011, 47(4): 1724-1731.
- [17] Ehsani M, Fahimi B. Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: state of the art and future trends [J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2002, 49(1): 40-47.
- [18] Krishnan R. Sensorless operation of SRM drives: R & D status [C]//*Proc IEEE IECON'01*. [S. l.]: IEEE, 2001: 1498-1503.
- [19] Lyons J P, MacMinn S R, Preston M A. Flux/current methods for SRM rotor position estimation [C]//*Conf Rec IEEE-IAS Annu Meeting*. Deanborn, USA: IEEE, 1991: 482-487.
- [20] Cheok A D, Ertugrul N. High robustness and reliability of fuzzy logic based position estimation for sensorless switched reluctance motor drives [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2000, 15(2): 319-334.
- [21] Nesimi E, Cheok A D. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drives using fuzzy logic based motor model [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2000, 15(6): 1029-1044.
- [22] Wang Z F, Cheok A D, Wee L K. Sensorless rotor position estimation algorithm for switched reluctance motor using fuzzy logic [C]//*Proc PESC*. [S. l.]: IEEE, 2001, 3: 1701-1706.
- [23] Xu Longya, Wang Chuanyang. Accurate rotor position detection and sensorless control of SRM for super-high speed operation power electronics [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2002, 17(5): 757-763.
- [24] Paramasivam S, Vijayan S, Vasudevan M, et al. Real-time verification of AI based rotor position estimation techniques for a 6/4 pole switched reluctance motor drive [J]. *IEEE Trans Magn*, 2007, 43(7): 3209-3222.
- [25] Cheok A D, Wang Z F. Fuzzy logic rotor position estimation based switched reluctance motor DSP drive with accuracy enhancement [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2005, 20(4): 908-921.
- [26] Reay D S, Williams B W. Sensorless position detection using neural networks for the control of switched reluctance motors [C]//*Control Applications*, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on. Kohala Coast, HI: IEEE, 1999, 2: 1073-1077.
- [27] Mese E, Torrey D A. An approach for sensorless position estimation for switched reluctance motors using artificial neural networks [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2002, 17(1): 66-75.
- [28] Hudson C A, Lobo N S, Krishnan R. Sensorless control of single switch-based switched reluctance motor drive using neural network [J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2008, 55(1): 321-329.
- [29] Zhong R, Wang Y, Xu Y Z. Position sensorless control of switched reluctance motor based on improved neural networks [J]. *IET Electric Power Applications*, 2012, 6(2): 111-121.
- [30] Estanislao E, Juan D X, Roberto C, et al. Sensorless control for a switched reluctance wind generator, based on current slope and neural networks [J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2009, 56(3): 817-825.
- [31] 夏长亮,王明超,史婷娜. 基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(13): 123-128.
- Xia Changliang, Wang mingchao, Shi Tingna. Position sensorless control for switched reluctance motors using neural network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(13): 123-128.
- [32] 夏长亮,谢细明,史婷娜,等. 开关磁阻电机小波神经网络无位置传感器控制 [J]. *电工技术学报*, 2008, 23(7): 33-38.
- Xia Changliang, Xie Ximing, Shi Tingna, et al. Position sensorless control of switched reluctance motor using wavelet neural networks [J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(7): 33-38.
- [33] Panda D, Ramanarayanan V. Sensorless control of switched reluctance motor drive with self-measured flux-linkage characteristics [C]//*PESC00*. Galway: [s. n.], 2000, 3: 1569-1574.
- [34] 邱亦慧,詹琼华,马志源,等. 基于简化磁链法的开关磁阻电机间接位置检测 [J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(10): 59-62.
- Qiu Yihui, Zhan Qionghua, Ma Zhiyuan, et al. The indirect position sensing of SRM on the basis of simplified flux method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(10): 59-62.

2001, 21(10): 59-62.

- [35] 郑洪涛, 蒋静坪, 徐德鸿, 等. 开关磁阻电动机无位置传感器能量优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 153-157.
Zheng Hongtao, Jiang Jingping, Xu Dehong, et al. Switched reluctance motor sensorless drive with energy optimizing control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 153-157.
- [36] Suresh G, Fahimi B, Rahman K M, et al. Inductance based position encoding for sensorless SRM drives[C]//Proc IEEE PESC 99. [S. l.]: IEEE, 1999, 2: 832-837.
- [37] Fahimi B, Suresh G, Mahdavi J, et al. A new approach to model switched reluctance motor drive application to dynamic performance prediction, control and design[C]//Proc IEEE PESC. [S. l.]: IEEE, 1998, 2: 2097-2102.
- [38] Gao Hongwei, Salmasi F R, Ehsani M. Inductance model-based sensorless control of the switched reluctance motor drive at low speed[J]. IEEE Trans Power Electron, 2004, 19(6): 1568-1573.
- [39] 蔡骏, 邓智泉. 一种开关磁阻电机无位置传感器控制方法[P]. 中国: ZL 201010238729. 4, 2010.
- [40] Cai J, Deng Z Q. Sensorless control of switched reluctance motor based on dynamic thresholds of phase inductance[J]. Electric Power Components and Systems, 2012, 40(8): 915-934.
- [41] Gallegos-Lopez G, Kjaer P C, Miller T J E. A new sensorless method for switched reluctance motor drives[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1998, 34(4): 832-840.
- [42] Bateman C J, Mecrow B C, Clothier A C, et al. Sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2010, 46(6): 2329-2337.
- [43] 蔡骏, 邓智泉. 一种开关磁阻电机无位置传感器转子位置估计方法[P]. 中国: ZL 2010238771. 6, 2010.
- [44] Lumsdaine A, Lang H J. State observers for variable reluctance motors [J]. IEEE Trans Ind Electron, 1990, 37(2): 133-142.
- [45] McCann R, Islam M S, Husain I. Application of sliding mode observer for switched reluctance motor drives[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2001, 37(1): 51-58.
- [46] 辛凯. 开关磁阻电机滑模观测器间接位置检测的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [47] Islam M S, Husain I, Veillette R J, et al. Design and performance analysis of sliding-mode observers for sensorless operation of switched reluctance motors [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2003, 11(3): 383-389.
- [48] Hossain S, Husain I, Klode H, et al. Four quadrant and zero speed sensorless control of a switched reluctance motor [J]. IEEE Trans Ind Appl, 2003, 39(5): 1343-1349.
- [49] Yang L W, Shin J W, Kim Y S. The rotor speed and position sensorless control of switched reluctance motor using the adaptive observer[C]//Proc TENCON 99. [S. l.]: IEEE, 1999, 2: 1450-1453.
- [50] Brosse A, Henneberger G. Different models of the SRM in state space format for the sensorless control using a Kalman filter power electronics and variable speed drives[C]//Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. London: [s. n.], 1998: 269-274.