

永磁同步电机控制系统综述

永磁同步电机以其优异的性能得到了越来越广泛的应用。永磁同步电机由于其原理和结构的不同,其控制方法也与其他交流电机有一定的差别。本文对永磁同步电机的基本控制策略进行了总结和阐述,对各种方案的发展现状和趋势进行了分析。永磁同步电机无机械传感器控制也是目前的研究热点,本文对无机械传感器控制中的转子位置和转速估计方法进行了总结和阐述。

关键词: 永磁同步电机 矢量控制 直接转矩控制 无机械传感器控制

清华大学 电机工程与应用电子技术系 郑泽东 李永东

随着电力电子技术及交流电机控制理论的发展和不断完善,交流电机调速正逐渐取代直流电机调速而得到广泛的应用。特别是具有高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线等优异性能的钕铁硼稀土永磁材料的出现和相应的工艺技术的发展,使得永磁电机成本不断降低,性能不断提高。近年来永磁材料的热稳定性和耐腐蚀性的改善以及电力电子技术的进一步发展,使永磁电机在高性能、大容量等领域中的应用得到了突飞猛进的发展。

永磁式同步电动机结构简单、体积小、运行可靠、功率密度高、重量轻、损耗小、效率高。和直流电机相比,它没有换向器和电刷等不可靠的部件;和异步电动机相比,它不需要无功励磁电流,因而效率高,功率因数高,力矩惯量比大,定子电流和定子电阻损耗减小,且转子参数可测,控制性能好,但它也有成本高、起动困难等缺点;和普通同步电动机相比,它省去了励磁装置,简化了结构,提高了效率,同时电机的形状和尺寸可以灵活多样^[1,2]。

永磁同步电机应用及控制要求 永磁同步电机的应用

主要有如下几个领域:

高精度位置或转速控制系统,如伺服系统等。主要用于航空航天器、军工武器系统、数控机床、纺织机、电梯、信息系统等。这一类系统对电机位置和转速的控制精度、稳定性、转矩脉动、响应速度、速度平稳性、低速性能、宽范围运行能力等方面有非常高的要求。

大容量系统如舰船推进系统等,在舰船推进系统中使用永磁同步电机可以灵活布置船上大型机械设备,便于操控和航行,螺旋桨等机械的震动和噪声较小,使船舶航行起来更加隐蔽。如果电动机可以低速运行,并直接与推进轴连接,那么可以省去机械的减速齿轮;与常规的机械推进比较,电力推进系统的重量和体积大大减小。

电动汽车等牵引系统,使用永磁同步电机可以减轻汽车重量、缩小体积、提高效率。在电动汽车驱动系统中,高速运行区域需要进行弱磁控制。为了降低成本和体积,提高系统可靠性等,无机械传感器

技术的应用也是研究的重点,控制方式主要采用矢量控制和直接转矩控制。

高效节能速度控制系统如风机、水泵、压缩机、家电、汽车辅助系统等,这一类系统主要运行在中高速区域,或者是有减速机构,对电机转速和位置的控制性能要求比较低。

直驱式风力发电系统,风力机轮直接驱动永磁同步机的多磁极转子,而电机的定子则通过逆变器同电网相连接,就构成直驱式风力发电系统。该系统不需要增速传动机构,转速低、机械损耗小、便于维护;另外该系统不需要外部励磁,在低风速下可以高效率发电;采用永磁发电机系统另外一个优点是易于实现电网故障下发电机系统的不间断运行。同时由于机舱重量减轻并改善了传动系统各部件的受力状况,可使风机的支撑结构减轻,基础费用等也可降低,运行维护费用也较低。

目前,永磁同步电机的基本控制方法主要有开环恒压频比控制(VVVF),矢量控制(磁场定向控制)和直接转矩控制等。其中矢量控制和直接转矩控制为闭环控制,控制性能较高,但是需要对电压、电

流、转子位置和转速等进行测量并形成反馈。一般需要在电机转子上安装机械传感器来测量电机转子位置和转速。机械传感器增加了电机体积和成本,复杂的连线增加了系统的复杂度,降低了可靠性。理论上只要知道电机绕组电压和电流就可以计算出转子位置,因此从上个世纪90年代开始无机械传感器的控制方法逐渐成为一个研究的热点。

永磁同步电机基本控制策略

恒压频比控制(VVVF)是一种低成本的开环无位置传感器控制方法,但是由于不能保证电流矢量方向和转子磁链矢量垂直,所以功率因数和效率都会降低,一般用于对性能特别是低速性能要求不高的调速系统中,如风机、水泵等。在电压幅值、频率和电机负载不匹配时容易出现不稳定现象。如果转子带阻尼绕组,则阻尼绕组可以保证电机的同步和稳定,但是对于无法安装阻尼绕组的电机,如表面贴式永磁同步电机,在恒压频比控制下的稳定性就成为一个问题。文献[3]提出利用有功电流信息来提高系统稳定性并利用无功信息来获得更高效率的恒压频比控制方法,可以获得更高的转矩响应速度,并且不需要前馈控制,但是需要测量电机定子绕组两相电流,硬件成本比较高。文献[4]和[5]提出通过测量直流母线电流来控制永磁同步电机的功率因数,从而提高系统的效率并保持稳定。

交流电机是一个多变量、强耦合、非线性的时变参数系统,很难直接通过外加信号准确控制电磁转矩,但若以磁链这一旋转的空间矢量为参考坐标,利用从静止坐标系到旋转坐标系的变换,就可以把定子电流中的励磁分量与转矩分量变成相互独立的标量、分别进行控制,即矢量控制,又叫磁场定向控制。根据磁场矢量方向定位的不同,矢量控制又分为转子磁场定向矢量控制、定子磁场定向矢量控制、气隙磁场定向矢量控制等^[6]。

永磁同步电机的矢量控制本质上是

对定子电流矢量相位和幅值的控制,把电流分离为励磁电流分量和转矩电流分量。由于永磁同步电机转子磁场由永磁体产生,所以在隐极式电机中一般选择把励磁分量电流控制为零,可以保证最大转矩/电流比。在凸极式电机中,由于存在磁阻转矩项,励磁电流分量也可以产生转矩,所以为了得到最大的转矩/电流比,d轴电流通常不为零。由于永磁同步电机转子结构的多样性,其定子电流控制模式也多种多样。对应不同的转子结构, $i_d = 0$ 控制、MTPA(单位电流最大转矩)控制、单位功率因数控制和恒磁链控制等控制方法分别被不同学者提出,其控制效率、功率因数和转矩输出能力各不相同。此外,在弱磁区域的d轴电流也不为零。

直接转矩控制技术是用空间矢量的分析方法直接在定子坐标系下计算并控制交流电机的转矩,借助于双位模拟调节器产生PWM信号,直接对逆变器的开关状态进行最佳控制,以获得转矩的高性能控制。它省掉了复杂的矢量变换,其控制思想新颖,控制结构简单,控制手段直接,信号处理的物理概念明确。永磁同步电机由于运行机理与异步电机不同,直到1997年,才由澳大利亚的Rahman M.F.教授给出了较为完整的永磁同步电机直接转矩控制理论。在此之后,越来越多的学者投入到永磁同步电机直接转矩控制的研究。

无机械传感器控制中的转子位置和转速估计方法

永磁同步电机转子位置和转速估计方法从原理上大体可以分为两种:一种是基于定子电压方程的方法,如反电势法、模型参考自适应法、龙贝格观测器、Kalman滤波器、低频信号等方法,这类方法主要应用于中高速区域控制,在低速区域中由于永磁同步电机反电势比较小,容易受到干扰和噪声的影响,所以应用受到限制;第二种是基于电机的凸极效应等非理想因素的估计方法,如高频信号注入法等,这类方法不依赖于电机参数,鲁棒性

较好。高频信号注入法等可以用于低速甚至零速区域。

反电势直接计算法利用可以直接检测的电机三相机端电压和电流来计算转子位置和转速,它的特点是计算简单,动态响应快,几乎没有什么延迟。这种方法在计算过程中需要准确的电机参数^[7]。

模型参考自适应辨识的主要思想是将含有待估计参数的方程作为可调模型,将不含未知参数的方程作为参考模型,两个模型具有相同物理意义的输出量。两个模型同时工作,并利用其输出量的差值根据合适的自适应率来实时调节可调模型的参数,以达到控制对象的输出跟踪参考模型的目的^[8]。

龙贝格观测器方法是根据已知的观测对象的状态方程建立一个观测器方程,观测器的输入和被观测对象一致,实时计算出状态变量的值以保证观测器的输出和观测对象的输出一致,从而保证观测器的状态变量能够和其实际值保持一致。为了保证观测器的观测精度和收敛速度,往往把观测器的输出和被观测对象的输出进行比较,把二者的误差作为反馈对观测器进行校正。

扩展Kalman滤波器是Kalman滤波器在非线性领域内的扩展,它考虑了系统参数误差和测量噪声等的影响,以最小化状态变量的观测误差为目标选择最优的反馈增益矩阵,保证系统的稳定性和收敛速度,所以非常适合于交流电机控制。一般来说,扩展Kalman滤波器可以采用与龙贝格状态观测器同样的状态方程,其区别在于龙贝格观测器的反馈增益矩阵是根据稳定性理论预先计算得到的,而扩展Kalman滤波器的反馈增益矩阵是根据迭代算法实时计算得到的。由于交流电机控制中的状态方程通常都是非线性的,反馈增益矩阵的值很难通过理论分析得到,实际中进行参数调试的难度也比较大。而扩展Kalman滤波器只需要设定系统噪声和测量噪声的协方差矩阵,并且都是对角线矩阵,所有元素都是正值,所以实验中参

数的试凑和调试比较容易^[9,10]。

在低速特别是零速下基于电机反电势的方法性能受到限制,高频信号注入法是一个很好的解决方案。由于受逆变器的限制,常用的是高频电压注入法。高频电压注入法主要有两种:旋转高频电压注入法和脉动高频电压注入法。由于凸极或者饱和效应的影响,永磁同步电机交直流电感不同,从而造成注入信号在不同的位置会产生不同的响应,检测这种差异就可以估计出转子磁链的位置。高频信号注入法的困难在于信号检测方面,为了降低对电机转矩和转速的影响,注入的信号都尽可能小。一般需要用带通滤波器把高频信号检测出来,再用高通、低通滤波器进行相应的处理得到包含转子位置误差的量,然后再用模型参考自适应的方法辨识出电机转速和转子位置,对滤波器性能要求较高。文献[10]提出了一种根据带通和低通等滤波器分离出来的误差信号,以转子转速、位置和加速度为状态变量,用Kalman滤波器建立观测器直接观测转子转速和转子位置的方法^[11]。

针对高频信号注入法需要利用电机的凸极效应等非理想特性的缺点,文献[12]中提出了低频注入的方法,在由估计的角度定向的同步旋转坐标系的d轴位置注入一个低频率电流信号,它在实际的q轴的分量会产生转矩波动并产生转速波动,从而在反电势上产生脉动。通过检测反电势的低频波动就可以得到转子位置估计误差的信息。该方法只利用电机的理想方程,但是由于注入信号频率比较低,对电机控制性能会产生不利影响。

无机械传感器控制中的起动问题

永磁电机无机械传感器控制中的另外一个重要问题就是如何起动。在电机起动之前由于没有电压和电流,所以前面所述的转子位置估计方法无法使用。在起动时,如果转子磁链位置误差过大,有可能会造成很大的电流冲击,电机反转甚至起动失败。一般来说,无机械传感器控制中

的永磁同步电机起动方式可以有如下几种^[10]:

固定转子初始位置的方法

在电机上施加适当的电压或电流信号让转子转到预定位置起动,这种方法需要根据负载的变化来选择合适的直流电压和电流值。

初始位置检测方法

由于凸极饱和特性的影响,造成定子绕组电感随转子位置角度而变化,因而不同的电压矢量会产生不同的电流响应。因此可以控制逆变器发出特定的电压信号,通过检测电机的电流响应来检测转子位置。这种方法的精度依赖于电流检测的精度和电机的凸极效应的大小。

直接起动的方法

利用龙贝格状态观测器和扩展Kalman滤波器等建立电机的全阶模型,包括电机的电气方程和机械方程,通过对参数的设置和一些特殊的观测器设计方法,可以允许转子初始位置有较大的误差,在电机起动时让观测器快速跟踪转子位置来起动^[8]。或者是在起动过程中通过对观测器误差收敛状态的分析,采取一些特殊的措施避免错误的收敛状态,保证电机正常起动。

开环起动方法

这种方法主要应用于基于反电势的转子位置和转速估计方法的无传感器控制中。让电机跟随一个旋转的定子磁场开环起动,当电机达到一个反电势方法能够准确估计转子位置的转速的时候,再从开环方式切换到闭环方式。这种方法必须仔细选择开环起动的方法以保证稳定性。这种方法的缺点在于降低了电机的起动性能,同时如何进行切换并减少切换过程中的冲击也是一个需要解决的问题。

异步起动方法

在电机转子上安装鼠笼条,按照异步电机方式起动,起动之后再通过一定的控制方法把转子转速牵入同步。这种方法需要对电机进行特殊设计,电机模型比较复杂,起动过程中控制方法也相对复杂。

结语

永磁同步电机具有优越的性能和广泛的应用前景,对其控制方法的研究有十分重要的意义,目前国内外对永磁同步电机的各种控制方法进行了较多的研究,取得了显著的成果。本文对永磁同步电机的控制方式进行了分析和总结,对各种控制方法的优缺点进行了比较,对无机械传感器中的转子位置和转速估计方法、无初始位置的电机起动方法等进行了总结和阐述。

作者简介

郑泽东 男 博士生,主要研究方向:电力电子技术及高精度伺服控制系统的研究。

参考文献

- [1] 唐任远.现代永磁电机理论与设计.北京:机械工业出版社,2000
- [2] 郭庆鼎,孙宜标,王丽梅.现代永磁电动机交流伺服系统.北京:中国电力出版社,2006
- [3] J. I. Itoh, N. Nomura, H. Ohsawa. A comparison between V/f control and position-sensorless vector control for the permanent magnet synchronous motor. Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002, vol. 3: 1310-1315.
- [4] R. S. Colby, D. W. Novotny. An efficiency-optimizing permanent magnet synchronous motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24: 462-469.
- [5] Y. Nakamura, T. Kudo, F. Ishibashi, et al. High-efficiency drive due to power factor control of a permanent magnet synchronous motor. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2): 247-253
- [6] 李永东.交流电机数字控制系统.北京:机械工业出版社,2002
- [7] M. Naidu, B. K. Bose. Rotor posi-

tion estimation scheme of a permanent magnet synchronous machine for high performance variable speed drive. Industry Applications Society Annual Meeting, 1992, vol. 1: 48-53.

- [8] 梁艳. 无速度传感器永磁同步电机控制系统研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大

学电机系, 2003

- [9] 张猛. 无速度传感器永磁同步电机控制及磁链观测[博士学位论文]. 北京: 清华大学电机系, 2006

- [10] 郑泽东. 永磁同步电机高性能控制及无机械传感器运行研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学电机系, 2008

- [11] 吴姗姗. 基于信号注入的交流电机无机械

传感器矢量控制研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学电机系, 2009

- [12] T. Kereszty, V.-M. Leppanen, J. Luomi. Sensorless Control of Surface Magnet Synchronous Motors at Low Speeds Using Low-Frequency Signal Injection. IECON, 2003, vol. 2: 1239-1243

(上接第10页)

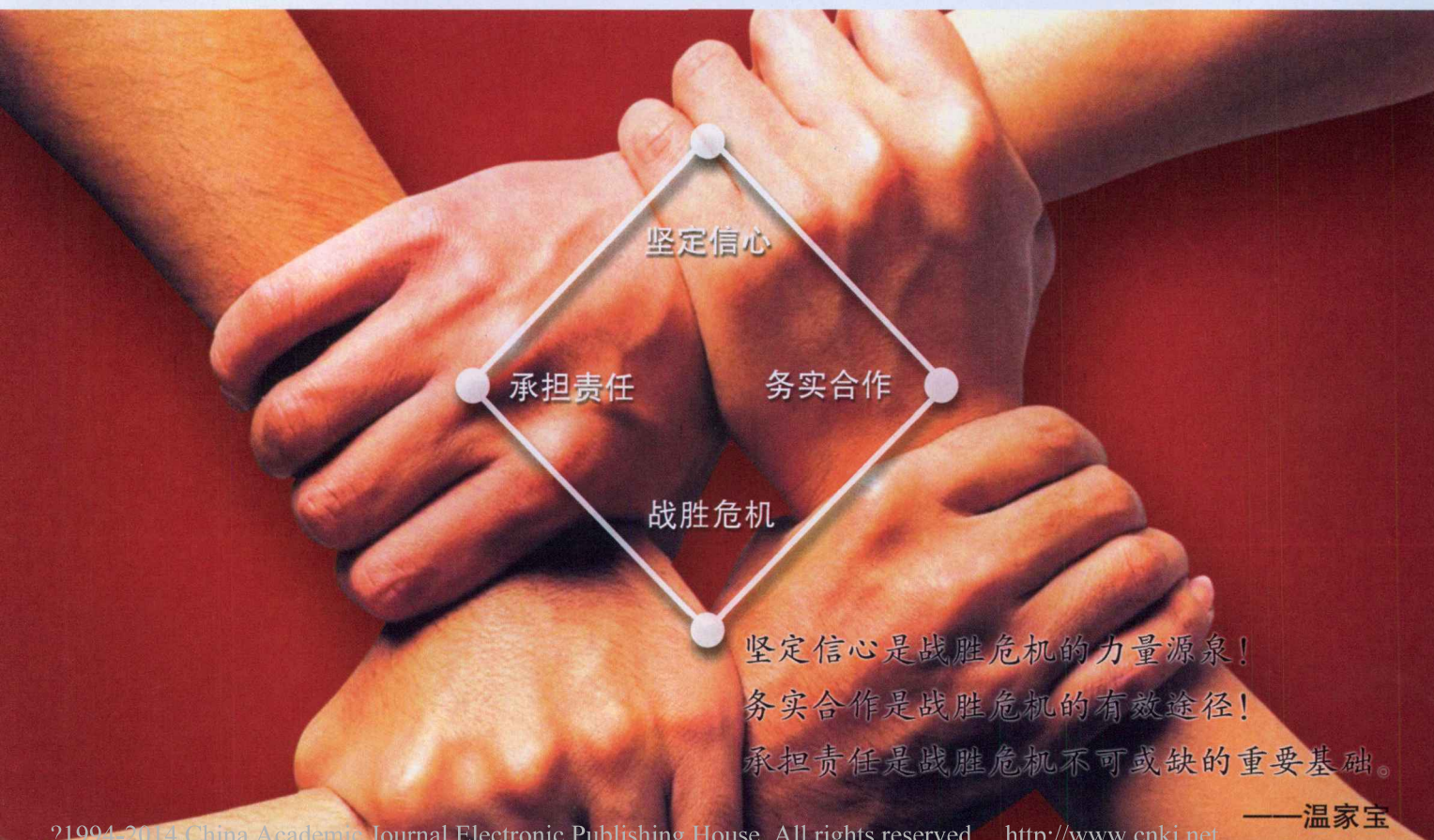
主要采取的形式是与平面媒体和网络的合作,通过有效的媒体手段扩大欧姆龙的知名度,使市场知道欧姆龙所拥有的核心的、具有竞争力的产品和服务,取得博收的效果。同时,在欧姆龙的内部,也会在具体的营业创新方面做比较大的变化。比如,在欧姆龙的销售部队里,成立了一支专业部队,成员们都是具备为客户提供解决方案能力的销售人员,这是作为推动方面的非常重要的举措。

针对华南地区的客户,为使产品得到

客户的认可、使产品衍生出的附加价值以及附加价值的增加效果得到客户的认可,欧姆龙一直注重技术支持力量的提升。在销售服务方面,欧姆龙的服务网络有进一步扩张,比如,广东地区设有深圳、东莞、佛山、中山、广州等事务所,并且每个事务所都有欧姆龙非常优秀的销售工程师进行驻扎;技术服务能力方面,欧姆龙在组织架构上也做了较大的革新即设立一支非常专业的技术服务队伍常驻于华南地区。相较于原来由上海总部进行远程服务

或者以出差的形式进行技术支持,今年,在华南地区成立了的这支具有较高技术服务能力的部队,可以更快速、更便捷服务华南地区的客户。沈总特别透露,从2008年开始,欧姆龙实施了一种新的管理模式——员工满意度管理,通过这种管理方式,希望把公司建设得更适合员工的发展,把握住优秀人才,最终的目的是向客户展示更高质量的服务。

严冬终将过去 春天就要来临



坚定信心

承担责任

务实合作

战胜危机

坚定信心是战胜危机的力量源泉!

务实合作是战胜危机的有效途径!

承担责任是战胜危机不可或缺的重要基础。

——温家宝