



电气工程系列丛书

ROTOR POSITION DETECTION AND
VECTOR CONTROL OF
SENSORLESS
PMSM IN FULL SPEED RANGE

刘小斌 著

永磁同步电机无传感器

转子磁极位置检测及其控制技术



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



电气工程系列丛书

本书由江苏高校品牌专业建设工程资助项目（TAPP，项目负责人：朱锡芳，PPZY2015B129）、常州工学院 - “十三五”江苏省重点学科项目 - 电气工程重点建设学科、2016 年度江苏省高校重点实验室建设项目 - 特种电机研究与应用重点建设实验室资助出版

刘小斌 著

永磁同步电机无传感器 转子磁极位置检测及其控制技术

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS
镇江

图书在版编目(CIP)数据

永磁同步电机无传感器转子磁极位置检测及其控制技术 / 刘小斌著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5684-0699-4

I. ①永… II. ①刘… III. ①永磁同步电机—磁极—位置检测器②永磁同步电机—磁极—位置控制 IV. ①TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 305343 号

永磁同步电机无传感器转子磁极位置检测及其控制技术

Yongci Tongbu Dianji Wu Chuanganqi Zhuanzi Ciji Weizhi
Jiance Ji Qi Kongzhi Jishu

著 者/刘小斌

责任编辑/李菊萍

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/5.375

字 数/175 千字

版 次/2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0699-4

定 价/32.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

永磁同步电机以效率高、体积小等优点被广泛用于工业控制系统之中,本书针对面装式永磁同步电机(SPMSM)的特点,从实际应用出发,分析如何利用无传感器技术代替位置检测装置。通过大量相关的文献调研,在总结前人研究成果的基础上,从转矩脉动、低速性能、高速性能、转子初始位置检测、转速及转子位置动态跟踪等多个方面研究 SPMSM 无传感器矢量控制技术,对无传感器永磁同步电机的转子位置检测及其矢量控制技术等相关问题进行了较为深入的研究,建立了全速度范围内无传感器矢量控制系统并进行仿真分析,主要内容如下:

首先,选定 SPMSM 为研究对象,对电机本体进行理论分析,了解电压、电流在不同坐标系间的转换关系,在此基础之上,研究 SPMSM 在不同坐标系下的数学模型,并构建其速度、电流双闭环矢量控制系统,对其进行仿真验证。

其次,在低速情况下对 SPMSM 无位置传感器控制技术进行研究,采用高频脉振电压信号注入方法,解决基波模型在低速时存在的问题。选择在直轴注入高频电压信号检测交轴电流分量的位置检测方法,对提取出的交轴高频电流进行信号处理,经滤波器滤波后得到转子位置观测器输入信号,从而实现低速时转子位置检测,对转子位置进行辨识。利用电机磁路饱和凸极效应原理,解决零速时可能产生的启动失败问题。获得转子位置初判值后,在估算坐标系下通入直轴正负方向的等宽电压脉冲,通过对

磁路饱和程度和直轴电流幅值的观察,判断直轴的正方向,实现 SPMSM 初始位置的准确定位。对于滤波环节,用高通滤波器在定子电流中提取出高频电流分量,作为转子位置跟踪器的输入信号,用同步轴坐标系下的高通滤波器,将定子电流高频成分中正序分量和负序分量均滤去,提取出基波分量反馈到电流调节器进行电流闭环控制。

然后,研究 SPMSM 中高速运行时的无传感器控制方法,选择滑模变结构控制(SMC)和自抗扰控制(ADRC)两种方法进行研究。先分别对 SMC 和 ADRC 进行改进,将滑模观测器原有的开关切换面变换为双曲正切函数 $\tan h$,并加入归一化处理的锁相环节。在自抗扰控制对象前端加入一个 fal 函数,通过不同控制对象的时间尺度计算,直接得到 ADRC 的各个参数,再将两种适用于 SPMSM 中高速运行的控制方法结合,在速度与电流自抗扰控制器设计中,引入滑模变结构控制,利用滑模变结构趋近律的方法,改进非线性扩张状态观测器(ESO)和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)中的非线性特性函数控制参数。对于改进的 ESO 和改进的 NLSEF,用连续的继电特性函数 $N(s)$ 来代替不连续的开关符号函数 $\text{sign}(\cdot)$,使控制量连续化,将高阶 ESO 和 NLSEF 的控制参数减少,以便于调节。对于 TD 环节,采用最速离散函数简化控制方式,使得 ADRC 系统能够缓解电机动态响应与超调间的矛盾。通过以上分析设计出速度电流环的二阶滑模自抗扰控制器。另外,通过对直轴电流输出方程的分析,设计出一种新的电流环一阶滑模自抗扰控制器,最终得到一种基于 SM-ADRC 的中高速运行控制方法,将其应用于 SPMSM 中高速矢量控制系统中,使得 SPMSM 矢量控制系统的中高速运行性能得到明显的优化。

最后,将适应于低速及零速时的高频脉振电压注入法(HFP-VI)和适用于中高速的 SM-ADRC 无传感器控制算法结合起来,为

了两种算法可以平稳切换,采用速度加权的方法,建立全速度范围 SPMSM 转子速度及位置复合观测器,并且建立 SPMSM 全速度范围内无传感器矢量控制系统,仿真验证了所设计复合观测估算方法的正确性。

在本书编写过程中,上海机电学院电气工程系李梦达老师帮忙整理、绘图、校对,付出了大量的劳动,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免会有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

著者

2017年8月23日

目 录

第1章 绪 论 001

- 1.1 研究背景及意义 001
- 1.2 永磁同步电机及其控制理论的发展 002
 - 1.2.1 永磁同步电机的发展 002
 - 1.2.2 PMSM 控制系统发展及国内外研究现状 006
- 1.3 交流电机无传感器控制技术国内外研究现状及适用于不同场合的无传感器控制技术 013
 - 1.3.1 交流电机无传感器控制技术国内外研究现状 013
 - 1.3.2 适用于不同场合的无传感器控制技术 019
- 1.4 本书主要研究内容 024

第2章 永磁同步电机及其矢量控制理论分析 026

- 2.1 PMSM 的结构及数学模型 026
 - 2.1.1 永磁同步电机三相静止坐标系($a-b-c$)模型 028
 - 2.1.2 永磁同步电机两相静止坐标系($\alpha-\beta$)模型 030
 - 2.1.3 永磁同步电机与转子同步旋转坐标系($d-q$)模型 033
 - 2.1.4 永磁同步电机与定子磁链同步旋转坐标系($x-y$)模型 035
- 2.2 PMSM 的矢量控制 036
- 2.3 空间矢量脉宽调制 038
- 2.4 永磁同步电机矢量控制系统的参数选择 041

2.4.1	常规 PI 控制器的设计	041
2.4.2	PI 控制器参数设定	042
2.5	本章小结	044
第 3 章	基于脉振高频电压注入法的 SPMSM 低速运行转子位置检测	046
3.1	脉振高频电压注入法(HFPVI)的基本原理	046
3.1.1	定子铁芯的非线性饱和和特性分析	046
3.1.2	SPMSM 高频信号注入及其位置信息提取	049
3.2	d 轴正方向判断	054
3.2.1	电感量的大小与饱和效应理论分析	054
3.2.2	基于饱和和凸极效应的转子 d 轴正方向判别	054
3.3	注入信号选取对位置估计误差的影响	058
3.4	基于同步轴高通滤波器的基波电流提取	059
3.5	仿真分析	062
3.5.1	高频脉冲电压幅值对电流误差项 i_{Δ} 的影响分析	065
3.5.2	电机静止时转子初始位置预估波形分析	068
3.5.3	电机低速运行时转子位置预估波形分析	075
3.6	本章小结	077
第 4 章	中高速运行无传感器 SPMSM 转子位置辨识研究	078
4.1	滑模变结构理论分析	078
4.1.1	滑模运动存在条件	078
4.1.2	滑模变结构的不足	081
4.2	基于 sign 函数的传统滑模观测器设计	082
4.3	改进型滑模观测器设计	087
4.3.1	对切换函数的改进	087
4.3.2	归一化处理锁相环节的速度位置信息提取	089

- 4.4 自抗扰控制技术 090
 - 4.4.1 PID 控制与自抗扰控制 090
 - 4.4.2 扩张状态观测器(ESO) 093
 - 4.5 自抗扰控制策略 094
 - 4.5.1 跟踪微分器 TD 094
 - 4.5.2 二阶非线性 ESO 095
 - 4.5.3 非线性状态误差反馈控制率 098
 - 4.6 SPMSM 自抗扰控制器设计 098
 - 4.7 改进型 ADRC 的设计 100
 - 4.7.1 改进型 ADRC 设计原理 100
 - 4.7.2 改进型 ADRC 仿真模型建立 101
 - 4.7.3 改进型 ADRC 的参数整定 103
 - 4.8 中高速运行矢量控制系统仿真分析 105
 - 4.8.1 $i_d=0$ 矢量控制仿真分析 105
 - 4.8.2 基于改进型 SMC 的 SPMSM 矢量控制系统仿真分析 113
 - 4.8.3 基于传统自抗扰控制器的仿真分析 116
 - 4.8.4 改进型 ADRC 在 SPMSM 矢量控制中的模型及仿真 117
 - 4.9 本章小结 122
- 第 5 章 基于 SM-ADRC 及 HFPVI 的全速度范围 SPMSM 转子位置辨识及其矢量控制 124**
- 5.1 基于 SM-ADRC 控制策略的中高速运行速度控制器设计 124
 - 5.1.1 SM-ADRC 速度电流控制器 124
 - 5.1.2 速度电流控制器三阶 SM-ESO 设计 126
 - 5.1.3 速度电流控制器最速 TD 的设计 128
 - 5.1.4 速度电流控制器二阶 SM-NLSEF 设计 129
 - 5.2 基于 SM-ADRC 的直轴电流环调节器的设计 130

5.3	SM-ADRC 矢量控制系统	132
5.4	全速度范围速度切换器的设计	134
5.5	基于 SM-ADRC 和 HFPVI 的 SPMSM 全速度范围矢量控制系统仿真分析	137
5.5.1	中高速 SM-ADRC 控制系统仿真分析	137
5.5.2	全速度范围转子位置辨识仿真分析	139
5.6	本章小结	143
第 6 章	总结与展望	145
6.1	研究总结	145
6.2	展望	148
	参考文献	149

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

在当今生产生活中,电能作为二次能源应用相当广泛,电机在机电能量转换中起到关键作用,电机设计及电机控制是目前针对电机学的两类主要工作。电机主要分为两大类,即直流电机与交流电机。在与人们联系比较紧密的数码产品、出行工具、家用电器等实际生产生活领域中,电机控制得到了长足的发展^[1]。轧钢机在运行中对驱动电机的动态控制、电动环保汽车切换不同工作状态、风机对风流量的调节、油田抽油电机在不同工况下的转速转矩要求等,都需要对电机的速度进行控制,所以,电机的调速技术极其重要。

直流调速与交流调速是电机调速系统的两大门类。因为直流电机发明得较早,具有控制简单、调速平稳、启动和制动性能良好等优点,在很长一段时期内,它主导着高性能传动系统的发展与运行。但是,因为直流电机结构上需要机械换向器与电刷,所以很难向高速度、大容量的方向开展研究^[2]。与直流电机相比较,交流电机具有质量偏轻、体积较小、不需要换向器和电刷、转动惯量小等较多优点,并且随着交流电机相关控制理念与电力电子技术的不断更新与进步,新型的控制策略、微计算机控制技术及微电子技术的涌现,使得交流调速技术有了极大的发展。交流调速技术已经具备较多的优良性能,比如调速范围宽、稳态精度高、动态响应快、四象限运行等。大量新的永磁材料被开采出来并通过相应的高端

技术应用于永磁电机的制备,更是大大降低了成本,并有效提高了电机性能。根据目前情况来看,交流电机调速已经慢慢取代了直流电机调速,在许多领域应用相当广泛,如数控设备、船舶航行推进系统、汽车、工业控制及航空航天等^[3]。在上述领域的应用中,永磁同步电机的调速系统起着相当重要的作用,该系统的正常运转和平稳运行将直接受到 PMSM 控制指标、性能与有效性的影响^[4]。

永磁同步电机有时需要在强扰动、强机械振动、强电磁干扰的特殊且复杂的环境中工作,目前相关理论支持与技术开发还不是太成熟与完备^[5],因此必须上升到一个新的高度,相关控制技术需要有长足的发展与进步。在我国,由于相关理论与技术的研究开始得比较晚,又受到国外在该领域技术垄断的影响,所以,很多的技术难题并没有得到较好的解决^[6]。充分发挥永磁同步电机在油田抽油机等相关设备上的作用,进一步提升永磁同步电机在各个领域的竞争实力,正是本书研究的真正意义。

1.2 永磁同步电机及其控制理论的发展

1.2.1 永磁同步电机的发展

1831年,巴洛(Barlow)发明了世界上第一台电机——永磁电机,该电机的励磁磁场是由永磁体产生的,但是,在当时的实际情况下,其所使用的永磁材料是磁能密度相当低的天然铁矿石(Fe_3O_4),这将直接导致用该永磁材料制备的电机具有庞大的体积,故不久就被另一种励磁方式所取代,即电励磁电机。电励磁电机在我国的相关研究起步比较晚,在20世纪80年代之前,相关的工作很少,1987年后我国才掀起永磁电机系统研发、制备和技术引进的热潮。

1) 永磁材料及其发展

永磁材料的发展与永磁同步电机的发展紧密相连,利用永磁体作磁势源制造电机已有100多年的历史。随着研究的逐渐深

人,研究者们对碳钢、钨钢等多种永磁性材料进行了开发,由于这些早期开发出来的永磁性材料的磁性能很低,永磁电机很快就被电励磁电机取代了。20世纪30年代到50年代,铝镍钴(AlNiCo)和铁氧体(Ferrite)永磁性材料相继出现,它们分别具有高剩磁和高矫顽力,为永磁电机的进一步发展创造了契机,在这一特定的时间段内,永磁电机的功率从几十毫瓦增大到几十千瓦,在很多领域的应用不断扩大,发展相当快。但AlNiCo的矫顽力值很低,易失磁, $B-H$ 曲线呈现方形,会引起较高的永久去磁,Ferrite的剩磁 B_r 值很小,不能为电机提供高工作磁密,这些缺点限制了这两种材料在永磁电机中的应用,并且由各种不同类型电力电子器件构成的电力电子装置还没有得到广泛应用,所以永磁同步电机的应用受到了一定的限制^[7]。科研人员通过不懈的努力,终于在20世纪60至80年代,开发出了钕铁硼(NdFeB)永磁材料(稀土永磁),这种永磁材料的磁性能(最大磁能积可达 431.3 kJ/m^3)高于其他永磁材料,被称为“磁钢”“磁王”。除具有极高的磁能积和矫力外,高能量密度的优点使钕铁硼永磁材料在永磁电机中得到广泛应用。

直到这时,永磁电机才真正发展起来。在近几十年中,与其相关的电力电子技术、计算机控制技术、驱动电路及辅助开发技术等不断发展与提升,使得永磁同步电机本体结构、控制电路、驱动电源及传感器等各个环节的技术储备不断提升,理论水平日益完善。目前,应用较多的稀土永磁电机主要经历了以下三个重要的发展时期:

第一个时期(1960—1970年):由于永磁材料高昂的价格,使得永磁电机的应用集中在航空航天、国防科技等重要的行业与领域;

第二个时期(1980—1990年):20世纪80年代,在钕铁硼永磁性材料的大量开发背景下,永磁电机成本价格大大降低。另外,这一时期永磁电机控制技术的发展得益于电力电子技术与微电子技术的发展,高精度控制更容易实现,永磁同步电机的研究与应用开始扩大到国民生产与生活领域;

第三个时期(1980—至今):在电力电子技术和微计算机技术

应用于永磁同步电机的设计与开发的同时,特种永磁材料相关技术飞速发展,永磁电机的利用提升到了一个更高的层面,相关控制也逐渐向转速高、转矩大、功率大、功能多及小型化方向发展。永磁电机最低转速已低于 0.01 r/min 、最高转速已超过 $300\,000\text{ r/min}$,单台容量高过 $1\,000\text{ kW}$ 的稀土永磁电机已经成为电力驱动系统的首选电机^[8]。

2) 永磁同步电机的分类

目前,永磁电机主要可分为以下三类:梯形波永磁同步电机、正弦波永磁同步电机和永磁直流电机。

平常所说的永磁无刷直流电动机(The Brush-less DC Motor,简称BLDC),正是梯形波永磁同步电机。BLDC在结构上与原直流电机相比有许多变化,这种变化主要体现在它将有刷直流电机的定子磁极用装有永磁体的转子代替,将原直流电机的电枢变为定子。有刷直流电机在工作时,主要通过机械换向器完成直流电流向交流电流的转换,而梯形波永磁同步电机则是通过将方波电流(实际电流近似梯形波)直接供给定子,使得原直流电机的定转子转换角色。因利用永磁体代替机械换向器与电刷,而被命名为永磁无刷直流电机。

正弦波永磁同步电机即日常生产生活中所说的永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,简称PMSM)。与BLDC相似,为了省掉励磁线圈、滑环与电刷,PMSM将绕线式同步电机转子中的励磁绕组用永磁体代替,通过电子换向来完成电机的运行。由于PMSM在定子绕组上所获得的感应电势波形为正弦波,所以仍然要求三相正弦电流输入到定子侧,故称为正弦波永磁同步电机。

正弦波永磁同步电机同样由两个主要部分组成,分别是定子和转子。PMSM的定子部分通常与异步电机的定子部分一样,是电动机在工作时不转动的部分,一般由一定规格的硅钢片叠压成铁芯,三相绕组对称分布在硅钢片铁芯的冲槽中,外部由机壳和端盖固定铁芯,它们共同组成电机定子。通过电源将对称的三相电流

加在空间上对称的三相定子绕组上,这样在定子内部空间中就会形成一个旋转磁场。 $n_0 = 60 f/P$ 为所产生的旋转磁场的转速,称为同步转速,表达式中, f 是通入电源的频率, P 为电机的极对数。PMSM 的转子部分,一般由转子铁芯、磁轭、永磁磁钢等构成,在电机的运转过程中连续运动,在其气隙空间产生磁场,从而产生电磁转矩,驱动自身运转。

从整体结构而论,永磁同步电机具有内转子式与外转子式两种主要的结构形态;从磁场方向而论,有轴向磁场与径向磁场之分;从定子结构而论,有定子无槽与有槽、集中绕组与分布绕组之分。另外,依据永磁体在转子中的位置变化,PMSM 可分为三大类,即面装式、插入式和内装式。

面装式是将永磁体粘贴在转子的表面;插入式是将宽度小于一个极距的永磁体镶嵌在转子表面下;内装式是将被铁芯包络的每个永磁体埋入转子铁芯内部。前两种结构应用于电机本体设计时能够设计出惯量较低、直径较小的结构,尤其在转轴上直接粘贴永磁体,能够得到较低的电感,这样有利于改进其动态性能,因此,许多交流永磁伺服电机都采用这两种结构形态。

内装式永磁同步电机与面装式永磁同步电机相比,具有机械强度高、磁路气隙小等特点,在弱磁情况下工作比较适合。此外,由于磁铁在插入式与内装式永磁同步电机中需要镶嵌在转子下,这使得电机能够实现在弱磁状态下的各种控制,并且转子的机械强度也有所增强,因此比较适合在高速情况下工作。但是,这种结构的永磁同步电机也存在诸多缺点,如制造工艺比较复杂、电机转矩控制过程中磁阻转矩复杂度增加等。故本书选取面装式永磁同步电机为研究对象,对其展开讨论及控制研究。

面装式交流永磁同步电机所采用的永磁材料的磁导率十分接近于空气,这使得交、直轴电感几乎相等,实际上可以把它看作隐极式同步电机的一种。插入式和内装式永磁同步电机的直轴电感小于交轴电感,可以看作凸极式同步电机的一种,由于交、直轴电感不同,凸极式电机在产生电磁转矩的同时还会产生磁阻转矩。

尤其是对于永磁体镶嵌在转子内的内装式永磁同步电机,该结构使电机交轴磁路与直轴磁路发生明显的改变,直接对电机转矩的生成产生影响,从而使永磁同步电机的电磁特性发生很大变化。

3) 永磁同步电机的特点

相对于感应电机,永磁同步电机具有诸多优点,如体积较小、质量较轻、功率密度较高等。由于转动惯量比较小,永磁同步电机在动态响应要求较高的驱动系统中应用比较广泛^[9];同时电子换向,增强了鲁棒性,提高了可靠性,因而在高速及超高速工作环境下应用广泛。永磁同步电机具有同步的定子磁场和转子磁场,并且转子本身由永磁体制成,与感应电机相比电机效率明显提高。

综上所述,永磁同步电机与感应电机相比,具有功率密度高、可靠性高、效率高及体积较小、结构相对简单、质量较轻等多方面优点,因此得到广泛应用。

1.2.2 PMSM 控制系统发展及国内外研究现状

变压变频控制、矢量控制和直接转矩控制是永磁同步电机控制系统的三大分类。

第一种变压变频控制是开环控制,不能反馈电机运行状态,不能准确控制电磁转矩,只是通过控制器给定参考电压和频率,在定子绕组上产生交替变换的正弦波电压进行开环控制。

第二种矢量控制方法是永磁同步电机的理想控制方法,通过该方法能够将永磁同步电机看作直流电机进行控制。永磁同步电机的矢量控制方法包含 $i_d = 0$ 控制、最大输出功率控制、单位功率因数控制、最大转矩电流比控制和弱磁控制等许多种方法^[10],其主要思想是通过对定子绕组电流幅值的控制和对转子永磁磁动势与定子磁动势之间的角度的控制,对电压、电流进行坐标变换,实现磁势变量之间的解耦,从而模拟直流电机。

第三种直接转矩控制,利用定子磁链定向直接控制电机定子磁链与转矩,这种控制方法导致其转矩脉动较大。

目前,PMSM 系统中利用率最高的两种控制系统是矢量控制系统和直接转矩控制系统^[11]。

1) 变压变频控制

变压变频控制(VVVF)以电机的外部变量作为控制变量,即以频率与电压为控制量。在VVVF调制器中输入参考电压和频率,由逆变器产生一个交流变换的正弦波电压,将它施加在电机的定子绕组上,并且使之运行在指定的电压和频率下。这种控制方式属于开环控制,在电机的端部无需引入反馈信号(如电压、电流或速度、位置等)。因为没有反馈信号的引入,所以不能实时监测电机的运行状态,很难对电磁转矩进行准确控制,这种控制方式只适合用在无需准确控制的工作环境。

实现对定子的电压幅值与频率控制是VVVF的控制特点,在低于基频的情况下,基于定子磁通量处于常量并不改变这样的目标进行控制,须按比例同时控制电压和频率,即图1.1所示的恒压频比控制。在低频时,定子压降通过抬高电压获得补偿。在高于基频的情况下,由于电压达到上限时,无法继续升高,只能不断提高频率,从而导致磁通变弱。由于开环控制的VVVF控制简单,且性价比较高,所以应用范围很广,这是其优势所在。但在负载变化频繁、转速较大等工作状况下,其优势不能凸显。目前,市场中的通用型变频器大多都采用变压变频控制方案。

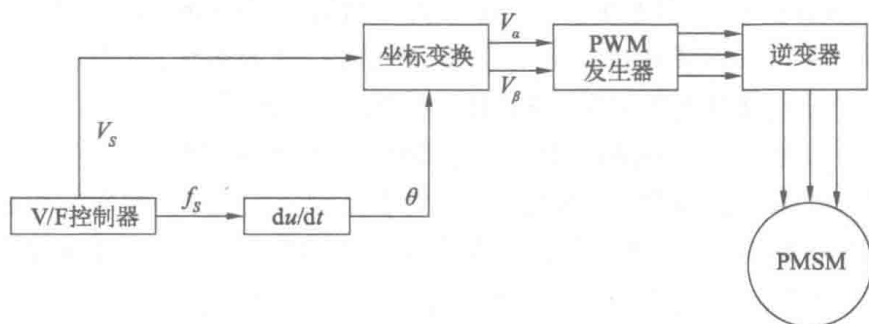


图 1.1 永磁同步电机变压变频控制系统框图

2) 矢量控制

20 世纪 70 年代初,德国工程师 Felix Blaschke 在其发表的《异步电机矢量变换控制的磁场定向原理》中明确提出了矢量控制理