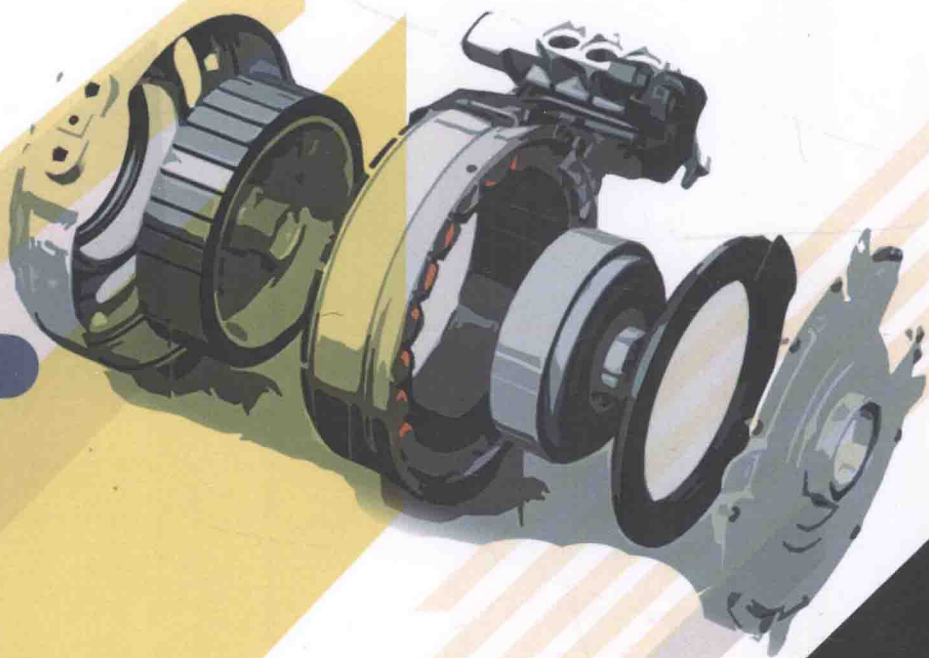


YONGCI TONGBU DIANJI KONGZHI JISHU

永磁同步电机控制技术

杨国良 李建雄 编著



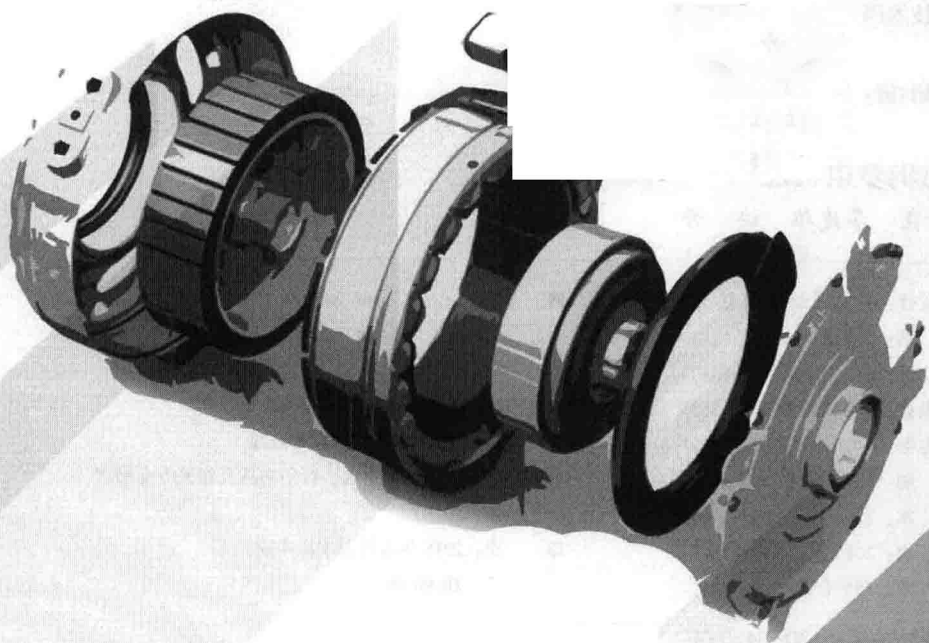
知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

YONGCI TONGBU DIANJI KONGZHI JISHU

永磁同步电机控制技术

杨国良 李建雄 编著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

永磁同步电机控制技术/杨国良, 李建雄编著. —北京: 知识产权出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-5130-3436-4

I. ①永… II. ①杨…②李… III. ①永磁同步电机-控制系统 IV. ①TM351.012

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 071525 号

内容提要

本书以永磁同步电机矢量控制和直接转矩控制为主题, 系统而全面地论述了永磁同步电机两电平/三电平矢量控制和直接转矩控制、滑模控制和容错控制的基本理论和仿真实现。

本书适合于电机控制、电气传动、电力电子、分布式新能源发电、微电网运行、自动化等领域的高年级本科生和研究生教材, 也可以作为大专院校、研究所和企业从事相关专业技术研发和开发人员的参考用书。

责任编辑: 吴晓涛

永磁同步电机控制技术

杨国良 李建雄 编 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司	网 址: http://www.ipph.cn
电 话: 010-82004826	http://www.laichushu.com
社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号	邮 编: 100088
责编电话: 010-82000860 转 8533	责编邮箱: sherrywt@126.com
发行电话: 010-82000860 转 8101/8102	发行传真: 010-82000893/82003279
印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司	经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店
开 本: 720mm×1000mm 1/16	印 张: 10.5
版 次: 2015 年 6 月第 1 版	印 次: 2015 年 6 月第 1 次印刷
字 数: 155 千字	定 价: 28.00 元

ISBN 978-7-5130-3436-4

出版版权 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

近些年来，随着我国国民经济的迅速发展，工业、电力、交通、新能源及其他一些相关领域对大容量电力电子变换设备的需求更加迫切，这些设备的功率目前已达到兆瓦级，而可控交流传动在兆瓦级范围内常常会和中压电网联系在一起。

目前，交流传动已经成为电气传动领域的主流，低压中小容量的变频调速技术在国内已得到广泛的应用，而对于中高压、大功率领域的应用研究尚处于起步阶段，主要依靠进口一些国外著名电气公司的变频传动装置，这些产品在国内的价格十分昂贵，而且核心技术仍为国外公司所掌握，所以我们很有必要研究属于自主知识产权的中高压、大功率变频装置。逆变器拓扑结构的发展与电力电子器件的发展是密切相关的。早期的高压大容量交流调速主要采用晶闸管（SCR），其开关频率低且不能自关断，使得逆变器的性能受到了很大限制，调速范围较窄。伴随着开关器件的发展，高压大容量逆变器也日益高性能化。如今大功率开关器件的容量已达到 GTO6kV/6kA、IGCT4.5kV/4kA、IGBT4.5kV/1.8kA 和 IEGT4.5kV/3.6kA。

在用新型半导体材料制成的电力电子器件中，最有希望的是碳化硅（SiC）功率器件。当前，美国 Cree 公司、德国西门子公司、日本 Toshiba 公司还有欧洲 ABB 公司等投入巨资研制新一代的电力电子器件——碳化硅功率器件。SiC 材料的耐压是硅材料的 10 倍，热导率是硅材料的 3 倍，结温可高达 200℃。SiC 功率器件的开关频率将显著提高，通态损耗和开关损耗减至 1/10。由专家预计今后十年内，碳化硅器件会有突破性的发展，必将推动中高压变频技术进入新的时代。

国内在大容量交流调速系统方面已有不少研究并获得了相应的研究成果，早期比较成熟的有两电平逆变器、降压-普通变频-升压结构（即所谓的高低

高压变频结构)、交交变频器电路以及变压器耦合的多脉冲逆变器等,以上这些电路是早期传统的拓扑方案。这些系统不但结构复杂而且所使用器件多为 SCR 和 GTO,开关频率低(一般在 400Hz 以下),谐波含量高,动态性能差,相当于国外 20 世纪 80 年代的技术水平,总体上落后了近 20 年。

在高压大容量变频器方面,国外产品一直处于垄断地位,ABB、西门子、东芝、三菱、罗宾康、阿尔斯通等国外著名电气公司都有基于多电平技术的变频器产品,主要拓扑结构包括二极管钳位三电平、飞跨电容钳位三电平和 H 桥串联结构等。而国内对多电平技术的开发和应用一直缺乏足够的重视,长期停留于实验室研究阶段。直到 90 年代末,国内在 H 桥串联型高压变频器的应用方面才有了突破,现已有多家公司研制出产品并投放市场,其中具有代表性的有利德华福、凯奇、先行等公司。其产品性能和国外产品相近,而价格极具竞争力,逐渐具备了与国外产品竞争的能力,大大缩短了和国外高压逆变器系统的研究和应用的距离。但总的来说,国内在这方面未形成气候,从装置总容量方面来看,与国外产品相比还有较大的差距;另一方面,从技术角度来看,手段也比较单一,拓扑结构主要集中在 H 桥串联形式,对于其他类型的多电平技术几乎没有应用。

在高性能大容量变频调速技术的研究和应用方面,国外远远地走在我们的前面,MVA 级的高性能逆变器已有产品投入市场,广泛应用于电力机车、轧钢设备、供水系统等场合,其性能指标相当高。例如,ABB 公司的 Acs600 和 Acs1000 系列变频器,采用了直接转矩控制技术,具有非常高的调速精度和动态性能,如使用速度传感器(1024 脉冲/转),调速精度可达 0.01% (稳态),若采用无速度传感器技术,则可达 0.1%~0.5%;又如阿尔斯通公司近期在中国推出的 Mv7000 型中压大功率变频器产品,集当今国际最先进的电气传动控制技术于一身:IEGT 大功率开关器件应用于主电路、飞跨电容钳位型三电平主电路拓扑结构、高集成度的模块化控制结构设计、矢量控制技术和异步电机低频转矩控制技术、低频消除谐波调制技术、功率因数为 1 的网侧三电平 PWM 整流技术,整套装置整体水平极为先进,代表了当今国际传动领域的最先进水平。此外,西门子公司则在三电平逆变器矢量控制方面有

着传统的优势，罗宾康公司则在 H 桥串联结构的矢量控制系统方面占据着领先的地位。与国外先进企业相比，国内高性能的变频传动技术一直是弱项，经过这些年的发展，小容量产品已经实现产品化，而高压大容量方面仍处于研究阶段，产品领域基本上是空白。因此，如何在这方面缩短与国外公司之间的差距，掌握具有自主知识产权的高压大容量高性能变频调速技术，打破国外产品的垄断，是我们必须肩负的责任。

本书共分 8 章。绪论，简述了永磁同步电机及其控制技术发展背景、分类与特点，永磁同步电机控制系统控制算法研究现状，以及永磁同步电机多电平控制技术发展状况；第 1 章主要介绍了永磁同步电动机的分类和转子结构、永磁同步电动机物理和数学模型；第 2 章主要介绍了永磁同步电机两电平矢量控制的基本原理、电压空间矢量控制（SVPWM）的原理以及矢量控制系统仿真的具体实现；第 3 章主要介绍了 PMSM 两电平直接转矩控制的原理以及 PMSM 直接转矩控制系统各模块仿真的具体实现；第 4 章主要介绍了多电平逆变器的发展及优点、PMSM 三电平矢量控制的基本原理、三电平逆变器中点电位平衡的分析，以及 PMSM 三电平矢量控制仿真的具体实现；第 5 章主要介绍了直接转矩控制的基本原理、三电平逆变器直接转矩控制的主要问题及虚拟矢量控制方法、PMSM 三电平直接转矩仿真的具体实现；第 6 章主要介绍了 PMSM 滑模控制基本原理、滑模控制设计方法、滑模控制在电机控制系统中的应用，以及 PMSM 滑模控制仿真实现；第 7 章主要介绍 PMSM 容错控制原理、逆变器故障及其诊断技术、逆变器故障容错拓扑和方案分析，以及永磁同步电机容错控制系统仿真与分析等。

本书的基本研究内容已经历多年的变化，特别是近几年的相关研究工作和相关技术飞速发展，永磁同步电机矢量控制和直接转矩控制的应用领域也越来越广泛，因而在写作过程中只能不断进行基本内容的调整。

本项研究工作得到“国家自然科学基金委员会与宝钢集团有限公司联合资助项目”（项目编号：U1260203）、“国家自然科学基金资助项目”（项目编号：61403332）、“河北省自然科学基金——钢铁联合研究基金资助项目”（项目编号：F2013203291）、“河北省高等学校创新团队领军人才培养计划项

目”（项目编号：LJRC013）的资助，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，我的研究生参与了部分章节的制图、仿真工作，向付出辛勤劳动的研究生张恩蓓、李雅静、杨梓、崔杰、崔幔、常心妍、郭永爱等同学表示感谢。

作者对书末所列参考文献的所有作者表示衷心感谢。

由于作者的学识有限且时间紧迫，在永磁同步电机控制技术领域还有很多内容没能在本书中得到反映，恳请读者谅解。书中内容、结构也难免有疏漏、不当和错误之处，敬请有关专家和各位读者对本书给予批评、指正。

编著者

2015年3月

目 录

绪 论	(1)
0.1 引言	(1)
0.2 永磁同步电机发展现状	(2)
0.2.1 永磁同步电机概念	(2)
0.2.2 永磁同步电机发展历程	(3)
0.2.3 永磁同步电机分类	(3)
0.2.4 永磁同步电机特点	(4)
0.3 永磁同步电机控制技术发展状况	(4)
0.3.1 核心器件技术发展	(5)
0.3.2 位置与速度检测技术发展	(6)
0.3.3 永磁同步电机控制策略	(7)
0.4 永磁同步电机控制系统控制算法研究现状综述	(8)
0.4.1 PI 控制	(9)
0.4.2 滑模变结构控制	(10)
0.4.3 自适应控制	(11)
0.4.4 模糊控制	(11)
0.4.5 神经网络控制	(12)
0.4.6 容错控制	(12)
0.5 永磁同步电机多电平控制技术发展状况	(13)
0.5.1 用于高压大容量交流调速的三电平逆变器典型 拓扑	(14)
0.5.2 高性能多电平交流调速技术	(16)

第 1 章 PMSM 构成原理	(18)
1.1 永磁同步电动机的分类和转子结构	(18)
1.2 永磁同步电动机物理模型	(19)
1.3 永磁同步电机数学模型	(23)
第 2 章 PMSM 两电平矢量控制	(25)
2.1 面装式三相永磁同步电动机矢量方程	(25)
2.1.1 定子磁链和电压矢量方程	(25)
2.1.2 电磁转矩矢量方程	(28)
2.2 面装式三相永磁同步电动机矢量控制	(30)
2.2.1 基于转子磁场的转矩控制	(30)
2.2.2 弱磁	(31)
2.2.3 坐标变换和矢量变换	(33)
2.3 电压空间矢量控制 (SVPWM)	(34)
2.3.1 空间矢量的定义	(35)
2.3.2 SVPWM 的原理	(36)
2.3.3 SVPWM 的合成	(39)
2.3.4 SVPWM 的扇区判断	(40)
2.4 矢量控制系统仿真	(41)
2.4.1 基于 Matlab 的 SVPWM 仿真	(42)
2.4.2 调节器设计	(46)
第 3 章 PMSM 两电平直接转矩控制	(55)
3.1 PMSM 两电平直接转矩控制的原理	(55)
3.1.1 直接转矩控制的基本原理	(55)
3.1.2 面装式 PMSM 转矩生成与控制	(56)
3.1.3 滞环比较控制与控制系统	(59)

3.1.4	磁链和转矩估计	(61)
3.1.5	转矩和磁链滞环控制原理	(63)
3.1.6	逆变器开关状态和电压空间矢量实现原理	(64)
3.1.7	定子磁链分区表和开关表的实现原理	(66)
3.2	PMSM 直接转矩控制系统各模块仿真模型	(68)
3.2.1	三相-两相变换模块	(68)
3.2.2	转矩和磁链观测模块	(69)
3.2.3	扇区选择模型	(70)
3.2.4	滞环比较模块	(70)
3.2.5	开关表实现模块	(71)
3.3	PMSM 直接转矩控制系统仿真	(74)
第4章	PMSM 三电平矢量控制	(78)
4.1	多电平逆变器的发展及优点	(78)
4.2	PMSM 三电平矢量控制的原理	(80)
4.2.1	二极管钳位式三电平逆变器拓扑结构分析	(80)
4.2.2	三电平逆变器开关状态分析	(83)
4.2.3	三电平逆变器控制技术	(84)
4.3	三电平逆变器中点电位平衡的分析	(91)
4.3.1	中点电位不平衡的原因	(92)
4.3.2	三电平逆变器中点电压波动分析	(92)
4.4	PMSM 三电平矢量控制仿真	(95)
4.4.1	PMSM 三电平逆变器 SVPWM 调制的 Matlab 仿真	(95)
4.4.2	系统仿真	(99)
第5章	PMSM 三电平直接转矩控制	(103)
5.1	直接转矩控制的基本原理	(103)
5.2	三电平逆变器直接转矩控制的主要问题及虚拟矢量控制	

方法	(104)
5.2.1 三电平逆变器直接转矩控制的主要问题	(104)
5.2.2 三电平直接转矩控制中的电压矢量选择	(105)
5.2.3 三电平逆变器虚拟合成矢量的直接转矩控制	(106)
5.3 PMSM 三电平直接转矩仿真	(109)
5.3.1 传统两电平 Bang-bang 控制仿真波形	(109)
5.3.2 永磁同步电机两电平 SVPWM 直接转矩控制仿真	(111)
5.3.3 三电平永磁同步电机直接转矩控制仿真	(113)
第 6 章 PMSM 滑模控制	(117)
6.1 滑模控制基本原理	(117)
6.2 滑模控制设计方法	(118)
6.2.1 传统滑模控制设计	(118)
6.2.2 高阶滑模控制方法	(121)
6.2.3 混合滑模控制方法	(121)
6.3 滑模控制在电机控制系统中的应用	(122)
6.3.1 滑模控制器在永磁同步电机系统中的应用	(123)
6.3.2 滑模观测器在永磁同步电机系统中的应用	(124)
6.4 PMSM 滑模控制仿真	(125)
第 7 章 PMSM 容错控制	(129)
7.1 引言	(129)
7.2 逆变器故障及其诊断技术	(130)
7.2.1 逆变器常见的故障	(130)
7.2.2 故障的检测与诊断技术	(131)
7.3 逆变器故障容错拓扑	(133)
7.3.1 软件容错	(133)
7.3.2 三相转两相容错	(134)

7.3.3 三相四桥臂容错	(137)
7.4 容错控制方案	(139)
7.5 永磁同步电机容错控制系统仿真与分析	(140)
参考文献	(147)

绪 论

0.1 引言

电机在过去几十年的工业发展进程中，发挥了至关重要的作用，不同类型的电机被成功地开发出来，并被广泛地应用于国民经济、日常生活、航空航天和武器装备等各个领域。由于永磁同步电机具有高功率密度、高效率、高可靠性及结构简单、体积小、重量轻等优点，它既可以满足高性能系统要求（如快速动态响应、宽调速范围和高功率因数等），同时，近年来永磁材料价格降低，也使它成为实现电机系统节能的首选，尤其在当前节能已经成为我国经济和社会发展的一项长远战略方针形势下，永磁同步电机驱动系统未来发展将会有更加广阔的前景。然而，永磁同步电机是一个多变量、强耦合的非线性系统，在其控制系统设计中，存在如电流耦合、系统饱和、参数摄动和外部扰动等诸多因素，直接影响着永磁同步电机系统性能，尤其在一些高性能应用领域，这些问题必须要面对和解决。

近年来，随着电力电子技术、微电子技术和电机控制理论的发展，交流电机驱动系统能够充分发挥出它们所具有的潜能，包括调速范围和动态性能，从而使其得到迅速发展。电机驱动系统在各种先进控制算法的控制下，能够在效率、鲁棒性和动态特性方面实现更优化控制。在现有硬件发展基础上，电机驱动系统性能更取决于电机控制软件，许多学者都提出各种控制算法用于估算电机参数，以便降低驱动系统成本，提高系统鲁棒性。其中，永磁同步电机无位置传感器控制是当前电机控制技术研究发展热点之一，它可以拓宽永磁同步电机应用范围，扩大市场需求。尤其在国家节能减排的宏观背景下，永磁同步电机已经成为实现电机系统节能首选技术

方案，开展该方面研究已经成为开发低成本永磁同步电机控制系统的重要技术实现途径。

0.2 永磁同步电机发展现状

0.2.1 永磁同步电机概念

永磁同步电机以高动态性能、高效率和轻量化等特点著称，它与电力电子技术和微电子控制技术相结合，可以设计制造出多种性能优异的机电一体化产品和装备，代表着 21 世纪电机驱动系统发展方向之一。

永磁同步电机驱动系统除电机本身外，还包括逆变器、电流、位置及速度传感器和控制器等组件。控制器主要负责处理传感器反馈信息及实现对逆变器的控制。图 0-1 是永磁同步电机驱动系统典型结构框图，该种结构被广泛应用于大多数永磁同步电机应用系统中。

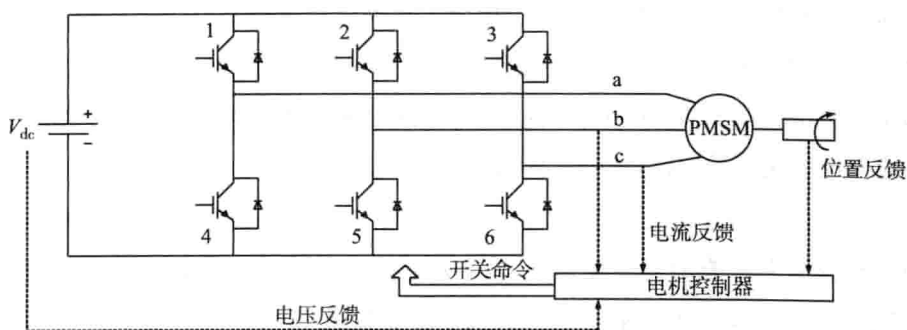


图 0-1 永磁同步电机驱动系统典型结构框图

在图 0-1 所示的驱动系统中，位置反馈主要用于实现定子磁链和转子磁链同步，同时也用于速度估计，以完成永磁同步电机速度和位置的控制。电流传感器用于控制器重构三相电流，并实现电机电流控制，从而完成电机转矩控制。直流母线电压反馈用于 PWM 控制器，将电机电压命令转化为开关

周期。由此可见,在永磁同步电机驱动系统中,电力电子、微电子控制器及位置检测技术等是永磁同步电机控制系统的关键技术,支撑着永磁同步电机控制系统的发展。

永磁电机是一种电能与机械能进行转换的电磁装置,它主要通过定子磁场和转子磁场相互作用而产生旋转转矩。与感应电机相比,两种电机在原理和结构等方面是相似的,定子结构基本一致,永磁电机与感应电机主要区别在于:转子激励是由固定的永磁体,而不是感应线圈实现的。

0.2.2 永磁同步电机发展历程

永磁同步电机的发展与永磁材料的发展密切相关。早在 20 世纪初,工业领域第一种永磁材料铝镍钴被生产出来,从而开启了永磁同步电机技术的发展历程。但铝镍钴永磁材料磁能积小,限制了永磁同步电机技术发展,直到稀土材料问世,才使永磁同步电机逐渐发展起来,并广泛应用于国民经济各个领域。

目前,获得广泛应用的稀土永磁电机主要经历了如下三个发展阶段。

第一阶段:20 世纪 60—70 年代,因稀土永磁材料价格昂贵,永磁电机的发展主要集中于航空、航天等特殊行业的高端领域。

第二阶段:20 世纪 80 年代,随着钕铁硼永磁材料的出现及电力电子与微电子技术的发展,永磁同步电机成本大为降低,控制更易实现,故永磁同步电机研究与应用开始扩展到工业和民用领域。

第三阶段:20 世纪 90 年代至今,永磁材料、电力电子和微电子及永磁同步电机设计与开发等技术都有了显著进步,从而使永磁电机的应用更为广泛,已经成为驱动系统的首选电机,代表着 21 世纪电机驱动系统发展的方向。

0.2.3 永磁同步电机分类

永磁同步电机主要由转子和定子两部分组成,其中定子由对称三相绕组和电枢铁芯组成,转子主要由转轴、永磁体及导磁轭铁构成。当三相正弦电

流作用于定子时，在定子和转子空隙中会产生一个相同形状的磁动势，定子磁通和转子磁通的交互作用使永磁同步电机产生电磁转矩。

根据转子中永磁体位置不同，永磁同步电机可分为面装式、内插式和内埋式。面装式永磁同步电机的转子是由永磁体在转轴表面简单结合的，故该结构机械强度有限，但从磁性的角度看，该结构具有一定优势，主要是因为空气和磁铁几乎有相同的磁导率，永磁同步电机直轴和交轴电感相等，故转子磁场和定子磁场的交互不会产生磁阻转矩。

内插式和内埋式电机，磁铁被嵌装于转子内，该结构增强了转子机械强度，并且使得电机易于实现弱磁控制，比较适合高速的运行。但该结构电机的主要缺点是有磁阻转矩，增加了电机转矩控制的复杂度，且安装制造工艺复杂。

0.2.4 永磁同步电机特点

相对于感应电机，永磁同步电机具有很多优点：

(1) 永磁同步电机能够提供较高的功率密度比，与相同功率的感应电机相比体积小，重量要轻；

(2) 永磁同步电机具有较小的转动惯量，易于应用于对电机驱动系统要求较高的动态响应领域；

(3) 永磁同步电机无滑环和电刷，使其鲁棒性增强、可靠性得到提高，更易应用于高速、超高速场合；

(4) 永磁同步电机转子磁场和定子磁场同步，且转子磁场是由永磁体构成，无直接电能消耗，电机效率相对感应电机明显提高。

由此可知：永磁同步电机相对于感应电机具有高功率密度、高效率、高可靠性及结构简单、体积小、重量轻等优点。

0.3 永磁同步电机控制技术发展状况

永磁同步电机驱动系统发展离不开电力电子技术、微处理器技术、检测

技术和电机控制技术的支撑，在此简单介绍以上相关技术发展情况，以便于更好理解永磁同步电机驱动系统发展水平。

0.3.1 核心器件技术发展

电力电子功率器件和微处理器是支撑电机控制系统发展最为基础的核心器件，它们是电机控制系统发展的物质基础，影响着控制算法应用和电机控制系统发展水平。电力电子功率器件发展是电力电子技术发展核心，推动着电机控制等相关领域发展。电力电子功率器件已经经历四个发展阶段：第一阶段是 20 世纪五六十年代以晶闸管为代表，主要应用于低频、高频变流领域；第二阶段是 20 世纪七八十年代以 GTO、GTR 和功率 MOSFET 为代表，推动了变流器高频化发展；第三阶段是 20 世纪后期以 IGBT 为代表，由于其优越性能使其成为电力电子应用领域的主导功率器件；目前电力电子功率器件已经进入第四阶段，即以 PIC、HVIC 等功率集成电路为代表的集成化发展阶段，新一代的智能功率模块（IPM）将功率器件与驱动、检测和保护等电路集成于一体，从而使电机驱动系统开发更为便捷、可靠性更高，功率密度比更高。

微处理器发展直接制约着电机控制算法的实际应用。由于受微处理器技术发展水平制约，最初矢量控制策略等都只是停留在理论研究基础上，随着微处理器技术快速发展，使许多高性能控制算法应用成为可能。在近年来，美国 TI、MOTOROLA 和 AD 等公司都推出了面向电机控制的专用高速数字信号处理器（DSP），促进了电机 PWM 控制和电流控制发展，这些 DSP 都具备多通道 AD 转换和 PWM 控制功能等，并且它们中有的是采用浮点运算，大大提高了数据处理能力，可以满足对电机驱动控制更复杂控制算法的运算，实现更高水平的控制。尽管数字信号处理器大大提高了电机控制系统性能，但对于高响应、复杂调节技术实现仍然是困难的。同时，CPLD/FPGA 等技术发展为实现 PWM 控制提供了新的方法。应用 CPLD/FPGA 技术可以实现 PWM 控制的快速建模、简化硬件和软件设计，提高了开发和运算效率，实现了高性能电机控制。目前该项技术刚刚起步，还有待进一步完善。