

HUNHE LICI TONGBU DIANJI JIQI QUDONG XITONG

---

# 混合励磁同步电机及其 驱动系统

---

黄明明 著



黄河水利出版社

# 混合励磁同步电机及其 驱动系统

黄明明 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书在广泛分析国内外永磁同步电机原理及其控制理论、控制方法的基础上,对混合励磁同步电机的数学模型、控制原理和控制方法进行了深入的研究,本书的主要内容包括以下几个方面:首先阐述了基于 Isight 软件的混合励磁同步电机的优化设计方法;其次提出了几种不同的电机控制方法,分别是基于二区控制的基本电流控制算法、基于三区控制的铜耗最小化控制算法以及将模糊控制与粒子群优化算法相结合的弱磁控制方法。基于上述算法,为优化电机静态性能、动态性能及效率,进一步提出了一种通过自适应调节弱磁基速系数控制方法。在理论分析基础上,搭建了电机控制系统仿真模型和实际控制电路。通过大量的仿真与实验结果,验证了所提出的控制算法的有效性与先进性。

### 图书在版编目(CIP)数据

混合励磁同步电机及其驱动系统/黄明明著. —郑州:  
黄河水利出版社,2016. 10

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1326 - 4

I. ①混… II. ①黄… III. ①同步电机 - 励磁机 -  
驱动机构 - 研究 IV. ①TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 256086 号

组稿编辑:陶金志 电话:0371 - 66025273 E-mail:838739632@qq.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www. yrcp. com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:10.75

字数:190

印数:1—1 000

版次:2016 年 10 月第 1 版

印次:2016 年 10 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

## 前 言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Machine, PMSM)以其高功率密度、高效率、结构简单等优点,在工业、国防、航空航天、舰船等领域获得了广泛的应用。然而,由于 PMSM 励磁控制困难,以及弱磁控制对永磁体的去磁风险,在一定程度上影响了 PMSM 的发展和應用。混合励磁同步电机(Hybrid Excitation Synchronous Machine, HESM)是 20 世纪 80 年代由俄罗斯学者最早提出的一种新型电机结构形式。与传统的电励磁同步电机及 PMSM 结构不同,HESM 中既有永磁体又有励磁绕组,两个磁势源同时存在。它集成了电励磁同步电机调磁方便且调磁容量小和 PMSM 效率高、转矩/质量比大等优点,同时克服了 PMSM 磁场调节困难的缺陷,有较大的推广应用价值,特别适合于恒功率、宽调速的驱动和恒压发电等领域的应用,在工业应用领域具有广阔的应用前景。因此,将永磁与电励磁进行合理的有机结合,研究开发既综合电励磁电机与 PMSM 的优点,又能克服各自缺陷的 HESM,从而最大限度地发挥两者的优势,成为电机领域的一项重要研究课题。

本书在广泛分析国内外 PMSM 和 HESM 的控制理论与方法的基础上,针对 HESM 及其控制系统建模、控制策略与系统仿真、软硬件实现与实验验证进行了深入的研究,提出了几种不同的控制策略。通过大量的仿真与实验,验证了所提出的控制系统模型及其控制策略的有效性与先进性。本书主要研究内容和成果如下:

(1) 系统介绍了课题的研究背景和意义、主要的宽调速电机类型及其优缺点、HESM 与其他宽调速电机相比所具有的优势、PMSM 和 HESM 驱动系统常用的各种控制方法等,并针对目前所提出的 HESM 控制方法的特点做了比较深入的分析。

(2) 基于现代电机设计的一般流程,采用三维有限元 APDL 参数化建模分析方法对电机结构参数对电机主要性能的影响进行了详细分析,为电机的合理设计提供参考。在电机结构设计上,应用了 Isight 软件结合有限元仿真软件 Ansys 及系统仿真软件 Matlab,进行了综合优化设计,实现了 HESM 的综合性能优化。依据所提出的电机设计方法,设计并制作了一台 27 槽 8 极样机。最后,通过实验验证了 HESM 设计的合理性与正确性。

(3) 分别建立了电机在三相静止和两相旋转坐标系下的数学模型,并给出其控制系统的磁链方程、电压方程、转矩方程和机械运动方程。应用 Matlab/Simulink 软件,建立了 HESM 的矢量控制系统仿真模型,简要介绍了控制系统中各控制模块的工作原理,并指出 HESM 与 PMSM 控制系统的主要区别和联系。最后对所建立的 HESM 控制系统模型进行了仿真分析,仿真结果证明了所建控制模型的正确性。

(4) 提出了一种基于二区控制的基本电流分配算法及其效率优化方法。该算法将 HESM 的整个调速范围分成两个调速区,低速区根据电机负载情况实施增磁或无励磁控制,高速区则采用保持反电动势不变的分段弱磁控制。为提高电机的弱磁控制性能,在上述电流控制算法中,进一步应用自适应方法对弱磁基速系数  $k_b$  进行动态调节。仿真和实验结果证明了所提出的控制方法的有效性。

(5) 提出了一种基于三区控制的铜耗最小化电流分配算法。该算法将整个调速范围分成三个调速区:低速区由于反电动势较低,采用无电压限制的铜耗最小控制;中速区受电枢端电压限制,采用  $i_d = 0$  的矢量控制,同时对励磁电流进行适度增磁或无励磁调节;高速区为弱磁调速区,结合铜耗最小化与反电动势不变两个约束条件,对励磁电流和  $d$  轴电流进行调节。通过仿真和实验表明,采用铜耗最小化算法,具有比基本电流控制算法更高的效率,实现了电机效率的最优化控制。

(6) 提出了一种模糊控制结合 PSO 算法的效率最优化控制方法。其原理是在弱磁调速过程中,当电机处于调速过渡阶段时,通过模糊控制对电流进行初步调节,使电机迅速启动或进行状态调整,获得较高的动态性能;当电机进入稳态运行区后,以铜耗最小化为目标,采用 PSO 算法对电流进行优化,使其实现了效率最优控制。

(7) 搭建了基于 TMS320F2812 + AT89C55WD 架构的 HESM 控制实验系统,给出了控制系统硬件电路框图和主要的程序流程图,详细介绍了部分关键电路的工作原理及其优化设计。对比较重要的模拟采样信号,提出了包括多通道采样、数字校正及提高电路板电磁兼容性的 PCB 设计方法。本书最后介绍了 HESM 样机的结构与工作原理,给出了电流开环控制输出特性实验的结果,验证了样机具有低速大转矩和宽调速的特性。

(8) 对本书主要研究工作与成果进行了总结,指出 HESM 及其驱动系统研究存在的问题,以及未来的研究、发展方向。

在本书编写过程中,杨成峰博士在 HESM 结构设计与电磁设计方面给予

了很多帮助,在此表示衷心的感谢!另外,本书还参考了一些国内外同行发表的研究成果,在此一并表示最诚挚的感谢。最后,还要感谢我的妻子蒋红光的大力支持!

随着社会的发展、科学技术的进步,本书中提出的一些理论和方法也会得到相应的优化和改进,加之作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请各位专家、学者批评指正。

作 者

2016年8月

# 目 录

## 前 言

第 1 章 绪 论 .....	(1)
1.1 宽调速电机简介 .....	(1)
1.2 PMSM 的主要控制策略 .....	(7)
1.3 混合励磁电动机的控制策略发展 .....	(10)
1.4 本书的主要内容 .....	(17)
第 2 章 HESM 的优化设计 .....	(19)
2.1 HESM 的磁路结构及调磁性能比较 .....	(19)
2.2 ASHESM 的电磁与结构设计 .....	(27)
2.3 电机结构参数对电机性能的影响分析 .....	(32)
2.4 基于 Isight 软件的 HESM 优化设计 .....	(40)
2.5 样机制作与实验验证 .....	(43)
2.6 本章小结 .....	(49)
第 3 章 HESM 数学模型及其控制系统的建模与仿真 .....	(50)
3.1 HESM 的数学模型 .....	(50)
3.2 HESM 的控制系统建模 .....	(60)
3.3 仿真结果分析 .....	(68)
3.4 本章小结 .....	(73)
第 4 章 基本电流控制算法及其弱磁控制性能优化技术 .....	(74)
4.1 基本电流控制算法 .....	(74)
4.2 仿真结果分析 .....	(81)
4.3 实验结果分析 .....	(87)
4.4 弱磁基速系数的自适应调节 .....	(89)
4.5 本章小结 .....	(98)
第 5 章 基于铜耗最小的效率优化控制研究 .....	(99)
5.1 铜耗最小化控制原理 .....	(99)
5.2 基于铜耗最小的速度分区控制原理 .....	(100)
5.3 铜耗最小化控制算法分析 .....	(101)

5.4	仿真结果分析 .....	(107)
5.5	实验结果分析 .....	(109)
5.6	本章小结 .....	(112)
<b>第 6 章</b>	<b>基于模糊弱磁控制的粒子群优化技术研究 .....</b>	<b>(113)</b>
6.1	模糊控制概述 .....	(113)
6.2	HESM 模糊弱磁控制器设计 .....	(116)
6.3	模糊控制仿真结果分析 .....	(121)
6.4	基于模糊控制的 PSO 技术 .....	(123)
6.5	FC - PSO 仿真结果分析 .....	(130)
6.6	本章小结 .....	(133)
<b>第 7 章</b>	<b>HESM 控制系统软硬件设计与特性实验 .....</b>	<b>(134)</b>
7.1	硬件电路设计 .....	(134)
7.2	软件设计 .....	(144)
7.3	模拟采样信号的测量与校正技术 .....	(147)
7.4	本章小结 .....	(151)
<b>第 8 章</b>	<b>总结与展望 .....</b>	<b>(152)</b>
8.1	总 结 .....	(152)
8.2	展 望 .....	(154)
<b>附录</b>	<b>主要符号与缩写解释 .....</b>	<b>(155)</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(156)</b>



# 第1章 绪论

伺服驱动系统按工作电源性质的不同,可分为交流驱动系统和直流驱动系统。直流驱动系统中使用的电机为直流电机,直流电机具有良好的启动特性和调速特性,输出转矩较大,控制简单。但是这类电机的缺点也很明显,制造成本较高,存在碳刷,不便于维护,因此在很多应用场合,直流驱动系统逐渐被交流驱动系统取代。在交流驱动系统中,所使用的电机为交流电动机,交流电动机可分为感应电动机(或异步电动机)和永磁电动机,感应电动机结构坚固、简单及造价低廉,但是早期由于控制理论和控制技术不成熟,以及缺乏高性能的控制器,转矩控制比较困难,在伺服控制系统中应用并不普遍,直到后来随着矢量控制和直接转矩控制理论的出现与成熟应用,感应电动机才逐渐取代直流电动机,成为伺服系统中的主流电机。但是感应电动机存在其固有的一些缺陷,如启动转矩较低、低速时效率不高、功率因数偏低以及体积和重量较大等,因此在一些对效率、功率因数及转矩质量比等要求较高的应用场合,逐渐被永磁电动机取代。

永磁电动机由于结构简单、功率密度高、转矩质量比大以及效率高等优点,近年来得到越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。但是,永磁电动机的主气隙磁场是由安装在转子或定子上的永磁体产生的,在电机运行过程中基本上无法调节,如采用矢量控制,应用 $d$ 轴电流弱磁提速,则由于 $d$ 轴电流产生的弱磁磁通要穿过永磁体,磁路中等效磁阻较大,弱磁能力不强;如果弱磁电流过大,还可能造成电动机永久去磁的风险而损坏。因此,普通永磁电动机虽然有一些比较显著的优点,但是由于其较窄的调速范围,还是无法满足某些特殊的应用场合,如电动汽车的驱动电机,在启动、爬坡、重负载等情况下,需要具备低速、大转矩特性;而在平坦路面、负载较轻的情况下,则需具备高速驱动能力。因此,为解决以上矛盾,需要开发一种新型电动机取代普通永磁电动机(Permanent Magnetic Motor, PMM),满足某些特殊场合的需求。

## 1.1 宽调速电机简介

为获得具有低速、大转矩及宽调速性能的永磁电机,各国专家学者提出了

不同的解决方案。主要可归纳为五种,其对应的电机结构、特点如下。

### 1.1.1 可变气隙电动机

这类电机的气隙长度是可变的,在电机运行过程中,采用机械方法改变气隙宽度,从而达到增大或减小磁阻以调节气隙磁通的目的。这种方法的难点是在电机旋转过程中需要采用外力对转子的位置进行精确控制。在实际控制中,由于对两个平行平面移动的控制比较容易,因而轴向磁通电机比径向磁通电机更适合采用此种弱磁方式。Oh 和 Emadi 采用此种方法提高了一种轴向磁通电机的效率和调速范围<sup>[3]</sup>,如图 1-1 所示。华中科技大学申报并公开了一项关于定转子气隙可调的盘式电机的发明专利<sup>[4]</sup>,如图 1-2 所示,该发明专利根据转子转速的不同,通过气隙调节机构——螺杆来实时调节定子与转子之间气隙的大小,从而改善电机的性能。但是,上述电机由于结构和控制都比较复杂,在实用中有很大的局限性,目前市场上尚未见相关产品报道。

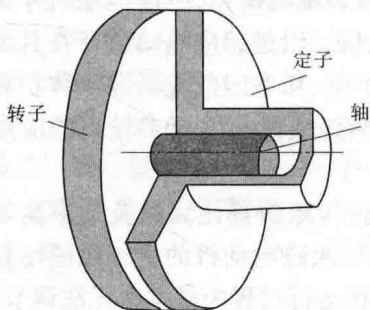


图 1-1 可变气隙长度的轴向磁通电机

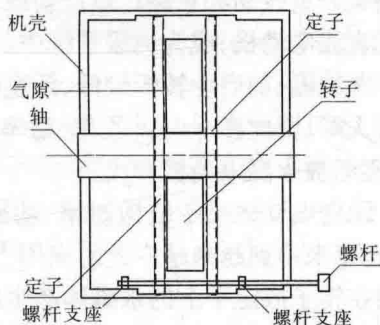


图 1-2 定转子气隙可调的盘式电机

### 1.1.2 复合转子结构永磁电动机

为了增加永磁电动机的直轴电感、提高电机弱磁调速性能,很多学者采用永磁段加磁阻段的复合转子结构<sup>[5]</sup>,如图 1-3 所示,即将永磁电动机转子沿向上设计成磁路上独立的两段:永磁段和磁阻段。永磁段如同传统的永磁电机,磁阻段则如同传统磁阻电机,磁阻段转子的铁芯轴线与永磁段转子的直轴重合。这种结构的变化使得电机的直轴电枢反应电感显著增加,有效拓宽了电机的弱磁调速区。但是这种结构也存在以下几个方面的不足:

(1) 由于磁阻段的存在,和传统永磁电机相比,缩短了轴向有效长度,增加了电机的漏磁,使永磁体的利用率降低了。

(2)虽然永磁段下的气隙磁场同传统永磁电机一样,但永磁段转子仅占转子轴向长度的一部分,定子绕组所交链的永磁磁链将随磁阻段的增加而降低,造成电机基本电磁转矩和功率密度下降。

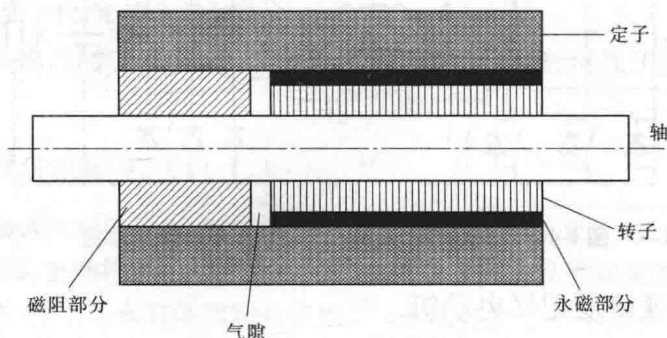


图 1-3 复合转子永磁电动机结构

(3)弱磁调速时,永磁段的气隙磁场减小得不多,主要是磁阻段直轴去磁场增强,而使得定子合成电动势基本不变,达到弱磁升速目的,但是永磁段较强的永磁磁场高速旋转时会造成与该永磁段相对应的那段定子铁芯的铁耗急剧增加。

(4)由于该结构形式导致直轴电感大于交轴电感,电机产生最大电磁转矩时定子电流矢量与转子永磁磁链矢量间的夹角 $\beta < 90^\circ$ ,在额定转速以下,控制直轴电流起增磁作用,磁阻转矩为正值,达到充分利用磁阻转矩的目的;但是在额定转速以上,为了提速控制直轴电流起去磁作用, $\beta > 90^\circ$ ,磁阻转矩变成负值,使得总的电磁转矩下降很快。

(5)电机转子加工工艺相对复杂。

### 1.1.3 可变定子绕组电动机

永磁电动机的反电动势与电枢绕组匝链的磁链成正比,并随转速升高而线性增加。因此,可通过减少定子绕组匝数的方法来削减各相匝链的永磁磁链,进而降低同一转速下的反电动势,提高电机的最高运行转速。减少定子线圈与永磁磁场匝链最直接的方法是改变实际线圈匝数。文献[10]提出在定子中采用不同连接方式的绕组来调整感应电动势。文献[11]采用转换开关直接改变定子线圈匝数来调节电机反电动势,如图 1-4 所示。该文献表明,当线圈匝数逐渐减小时,基速、峰值功率、调速范围等都随之相应增加。显然,对于该类电机,可变匝数越多,连出线也越多,增加了电机结构和控制的复杂性。

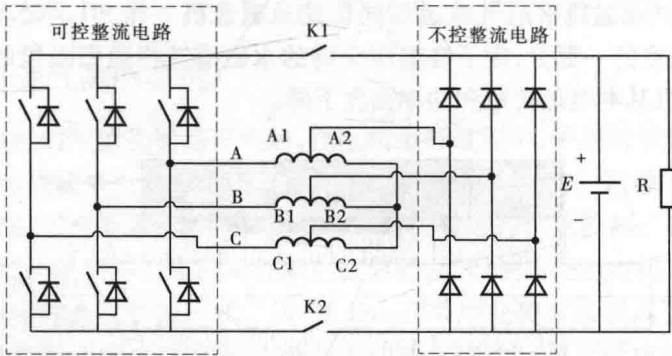


图 1-4 改变线圈匝数调节电动机反电动势原理图

### 1.1.4 可变磁通记忆电动机

这种新型电动机最早由德国学者 Ostovic 提出<sup>[12]</sup>,其结构如图 1-5 所示。该类电机采用低矫顽力永磁体,通过定子线圈或者另外附加线圈绕组,应用转子磁场定向的矢量控制方法,在直轴施加脉冲电流进行充磁或去磁改变永磁体的磁密,使电机在不同的调速区间具有不同的气隙磁密,从而获得低速、大转矩和宽调速等特性。在这类电机中,由于永磁体的磁密水平能被永磁体记忆,因此称之为可变磁通记忆电机(Variable Flux Memory Motor, VFMM)。

VFMM 电机截面结构如图 1-5 (a) 所示,其定子与传统永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)相同,而转子采用切向磁化的梯形永磁体、软铁和非磁性材料组成三明治结构。图 1-5 (b) 所示为施加某一相反的直轴电流脉冲后,永磁体被部分去磁。但是 VFMM 的控制比较困难,主要体现在两个方面:

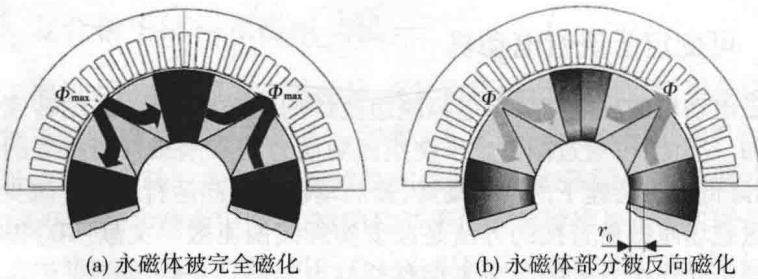


图 1-5 VFMM 的截面结构

(1) 大范围进行调速时,需要连续施加直轴脉冲电流调节永磁体的磁密

水平,在此过程中很难保持电机转速调节的平滑性、稳定性和可靠性。

(2)在反复充磁与去磁控制过程中,由于每次充磁、去磁都会产生一定误差,由此产生误差累积,不容易达到理想的调磁效果。因此,必须增加在线监测永磁体磁化水平的检测装置,才能根据电机给定转速实施精确的充磁或去磁控制,导致 VFMM 控制的复杂化。

总体来说,目前 VFMM 在控制技术方面还不成熟,仍处于实验室研究阶段。

### 1.1.5 混合励磁电动机

混合励磁电动机是20世纪80年代末由俄罗斯学者 V. A. Балагуров 最早提出的一种电机结构形式。它是在永磁电机的基础上发展起来的,内部包含两个磁势源,分别是永磁体和励磁绕组<sup>[13]</sup>,永磁体产生一个基本不变的主气隙磁通,通过改变励磁线圈的电流大小和方向来调节气隙磁通。因此,这种电动机既具有电励磁电机调磁方便、调磁容量大的特性,又具有永磁电机效率高、转矩密度大的优点,具有比较广阔的应用前景<sup>[14]</sup>。

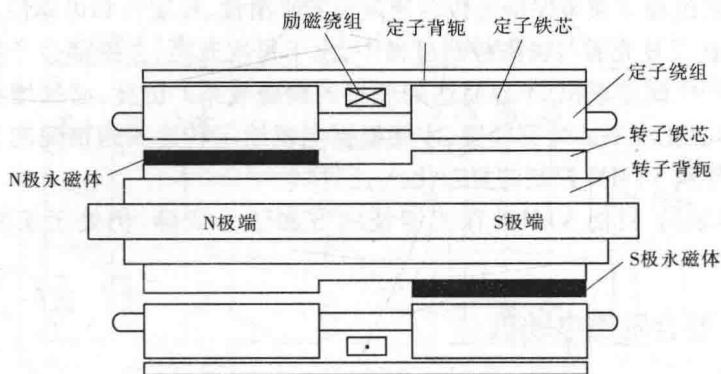
一种比较典型的混合励磁电动机结构<sup>[15]</sup>如图1-6所示。混合励磁电动机的定子电枢绕组为三相对称绕组,其定子铁芯沿轴向被环形直流励磁绕组分成两部分,定子两段铁芯由其外的背轭在机械和电磁上相连接,如图1-6(a)所示。混合励磁电动机的转子沿轴向分成两段,分别安装了永磁极和铁芯极,相邻极面下的永磁极与铁芯极交错排列,且两端的N、S永磁极和铁芯极相互错开,如图1-6(b)所示。

在混合励磁电动机内,永磁体提供一个近似恒定的磁通,磁通由N极穿过定子铁芯到达S极,通过转子磁轭形成回路,其大小主要由永磁体的几何尺寸和磁路上的磁阻决定。与此同时,励磁绕组中通入直流电流后,也会产生一个从铁芯极穿过定子、转子磁轭到达另外一个铁芯极的磁通,整个磁通路径上除主气隙外基本由低磁阻的铁芯构成。因此,通过改变直流励磁电流的大小和方向就可以方便地调节电机的气隙磁通,从而可以灵活地对混合励磁电动机实施增磁或弱磁控制。

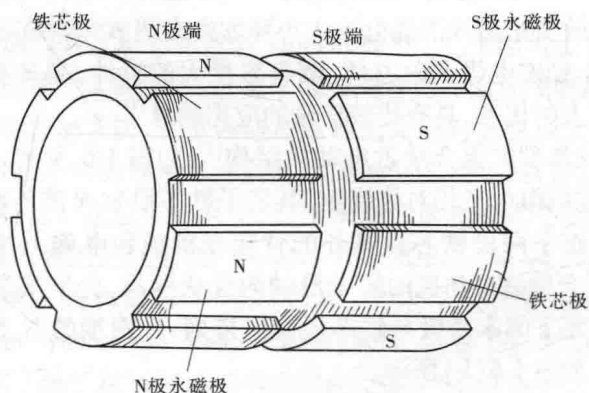
同其他电机相比,HESM(Hybrid Excitation Synchronous Motor,也称为混合励磁同步电机)具有以下几个特点:

(1)电机中同时存在两个磁势源,两者的磁通路径彼此耦合、相互影响,电磁参数关系比较复杂。

(2)在电机磁路中,除存在传统电机的径向磁场外,大多数还有轴向



(a) 截面图



(b) 转子结构

图 1-6 混合励磁电动机结构示意图

磁场。

(3) 电机结构设计自由度大, 电励磁绕组可以设置在定子上, 也可以设置在转子上, 还可根据需要改变转子结构。

(4) 励磁电流可以根据需要双向控制, 分别实施增磁或弱磁调速。

(5) HESM 输出电压为正弦波, 可作为交流发电机用, 工作时可构成交流调速电机或伺服电机, 和普通永磁同步电动机不同, 混合励磁同步电动机既可工作于恒转矩区, 也可工作于恒功率区, 具有较宽的调速范围。

综上所述, HESM 电机工作可靠稳定, 气隙磁密调节方便, 能够提供比电励磁同步电机大的转矩密度和功率密度, 因而特别适合输出电压要求稳定、调

速范围大、转矩及功率大的场合。

混合励磁电动机有多种分类方式,按永磁体安放位置分类,可分为转子永磁型混合励磁机<sup>[16]</sup>和定子永磁型混合励磁电动机<sup>[20]</sup>;按反电动势波形来分类,可分为混合励磁交流电动机<sup>[18]</sup>混合励磁无刷直流电动机<sup>[22]</sup>(Hybrid Excitation Brushless Direct Current Motor, HEBLDCM)及混合励磁双凸极电动机<sup>[20]</sup>(Hybrid Excitation Doubly Salient Motor, HEDSM);按励磁绕组与永磁体产生的磁势关系分类,可分为并联磁势源结构电机<sup>[16]</sup>与串联磁势源结构电机<sup>[23]</sup>。不同类型和结构的电机在效率和调磁特性等方面存在一定的差异,但具体哪一种结构的混合励磁电动机综合性能最优,至今尚无定论。

## 1.2 PMSM 的主要控制策略

从结构上来说,混合励磁电动机与永磁电动机的差别,仅在于前者比后者多了一个励磁绕组,通过对励磁绕组的电流调节,可以很方便地改变电机的气隙磁场。因此,对于 HESM 驱动系统,可以参照 PMSM 的控制原理和方法进行设计,下面先简要介绍 PMSM 的控制策略,然后分析现有的一些 HESM 控制方法。

### 1.2.1 变压变频控制

变压变频(Variable Voltage Variable Frequency, VVVF)控制是指通过调节电压与频率的比值,无需任何反馈信息,开环控制电机运行的一种控制方法<sup>[24]</sup>。VVVF 控制系统原理如图 1-7 所示。

VVVF 控制一般用在感应电动机的驱动控制中,在 PMSM 控制中应用较少。为增强 VVVF 控制的稳定性,采用 VVVF 控制方法的 PMSM 一般在转子上设有阻尼绕组,电机结构为内埋式。PMSM 的 VVVF 的调速原理与感应电动机类似,通过调节  $U/f$  的幅值来控制磁通大小。基速以下为恒转矩控制,保持  $U/f$  的值不变;基速以上为恒功率调速,并进行弱磁控制,  $U/f$  减小。通过逆变器进行脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)来实现频率的改变和电压幅值的变化,产生 PWM 信号的方法有正弦脉宽调制(Sinusoidal PWM, SPWM)和空间矢量脉宽调制(Space Vector PWM, SVPWM)两种。

VVVF 控制方法的优点是无须通过传感器采集速度、位置、电压和电流等反馈信号,硬件成本低,易于实现且价格低廉,属于开环控制。但是,由于它没有采用位置、转速和电流闭环控制,无法快速、精确控制电磁转矩的大小。因

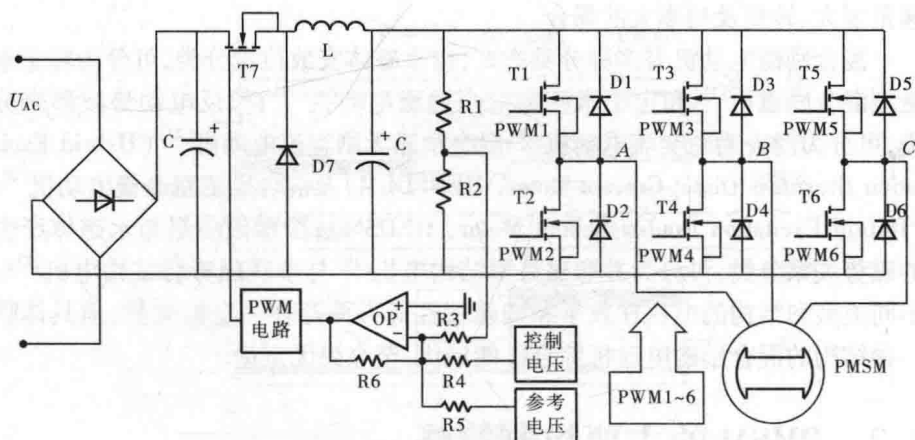


图 1-7 VVVF 控制系统原理

此,这种驱动系统仅适用于风机、水泵等无须精确控制的场合。

### 1.2.2 矢量控制

矢量控制系统框图如图 1-8 所示。矢量控制理论的提出,是交流调速领域的一个重大突破,该控制方法是由德国西门子公司工程师 Blaschke 于 1971 年提出的,发表在 Siemens Review 上,并申请了专利。矢量控制技术的诞生,从理论上解决了交流调速系统的高性能控制。但在实际应用中,由于电力电子技术及计算机技术的滞后等,当时并没有马上得到普及。直到 20 世纪 80 年代,以及此后的二三十年间,由于电力电子技术与计算机技术的进步,原来矢量控制存在的那些缺点已逐渐被弥补,该控制方法因而得到了长足发展。

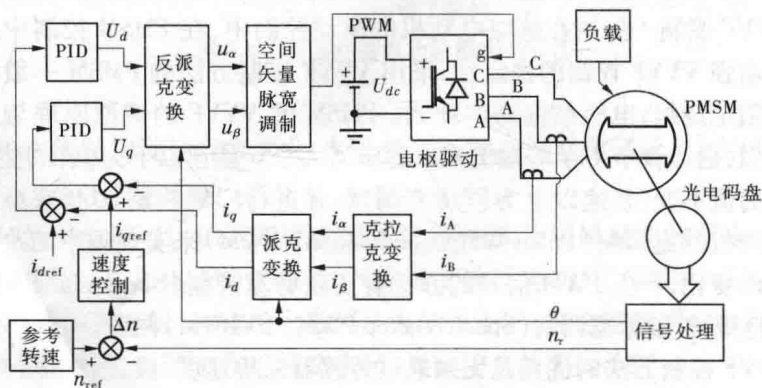


图 1-8 矢量控制系统原理框图



矢量控制的基本思想来源于直流电机的控制原理,后者可以分别通过控制其电枢电流和励磁电流来达到控制电机转矩的目的。矢量控制原理是在普通三相交流电机上设法模拟直流电机转矩控制的规律,通过磁场定向的  $dq$  坐标系,将电枢电流矢量分解为产生磁通的  $d$  轴电流分量和产生转矩的  $q$  轴电流分量,两个分量互相垂直,彼此独立,然后分别进行调节。由于矢量控制实现了电枢电流所产生的磁场的完全解耦,令其在静态性能、动态性能上可与直流电机相媲美,大大提高了交流电机的性能,从而使得直流调速系统逐渐被交流调速系统取代。

PMSM 矢量控制系统采用的电流控制模式主要有四种<sup>[25]</sup>:① $i_d = 0$  控制;②转矩/电流比最大控制;③ $\cos\varphi = 1$  控制;④恒磁链控制。以上控制方法有其各自的特点,分别适用于不同场合、结构和电气特性的 PMSM。

应用矢量控制技术,结合各种智能控制方法,PMSM 可实现高精度、高效率、高动态性能调速或定位控制。随着工农业、航空航天、军事等领域对高性能伺服系统需求的不断增加,特别是机器人、数控机床和电动汽车等技术的发展,PMSM 矢量控制系统具有广阔的发展和前景,对该系统的研究已成为中小容量交流调速和伺服系统研究的重点之一<sup>[28-34]</sup>。

### 1.2.3 直接转矩控制

1977年,Plunkeet 首次提出了采用转矩和磁链的 PI 调节以及 SPWM 方式实现电机控制的方法,该方法的控制结构和原理与现在的直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)类似,典型的 DTC 系统如图 1-9 所示。1985年德国 Bochum-Ruhr 大学的 Depenbrock 和日本的 Takahashi 分别提出了基于六边形磁链和基于圆形磁链的 DTC,或叫作直接自控制(Direct Self-Control, DSC)理论<sup>[35]</sup>。DTC 理论的出现,当时在很大程度上解决了上述矢量控制的不足之处,并以新颖的控制思想、简洁明了的系统结构和优良的动态性能得到了迅速发展。1991年,第一台三电平 DTC 大功率电力机车在德国投入使用。

DTC 的本质是在定子坐标系中结合空间矢量的分析方法,直接计算和控制电动机的电磁转矩<sup>[36-37]</sup>。DTC 的主要优点是:

(1)与矢量控制相比,无须进行旋转坐标变换,在静止两相坐标系上控制转矩和定子磁链,算法简单,对控制器性能要求较低。

(2)采用 Pang-Pang 控制,转矩响应速度快于矢量控制,具有较好的动态性能。

但是,DTC 的缺点也比较明显: