

交流永磁电机 变频调速系统

袁登科 陶生桂 编著

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化新技术丛书

交流永磁电机变频调速系统

袁登科 陶生桂 编著



机械工业出版社

本书是在交流电气传动日益普及以及永磁电动机进入电气传动领域应用的背景下撰写的。本书的特点是从数学模型、仿真模型和应用实例 3 个层面进行阐述,理论结合实际。

交流永磁电动机变频调速系统的相关内容甚多,本书详细讲述的内容如下:交流永磁电动机的数学模型和仿真模型;电压型逆变器数学模型、仿真模型和 SVPWM 控制技术;永磁同步电动机的特性曲线和全速范围内永磁同步电动机的磁场定向矢量控制技术;永磁同步电动机的直接转矩控制技术;基于 DSP 的永磁同步电动机变频调速系统实例分析以及提高系统性能的方法等,并配以部分仿真程序代码。

本书适合高等院校电气工程及其自动化专业本科生、研究生以及从事交流电气传动的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流永磁电机变频调速系统/袁登科,陶生桂编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-111-33589-4

I. ①交… II. ①袁…②陶… III. ①永磁式电机:交流电机-变频调速-控制系统 IV. ①TM351.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 031372 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:赵任 版式设计:霍永明

责任校对:闫玥红 封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.75 印张 · 263 千字

0001 - 3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-33589-4

定价:39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会成员

主任：王志良

副主任：赵相宾 牛新国 王永骥 赵光宙

孙跃 阮毅 何湘宁 霍勇进

委员：王永骥 王旭 王志良 王炎

牛新国 尹力明 许宏纲 孙跃

孙流芳 李永东 李崇坚 陈伯时

陈敏逊 阮毅 赵光宙 赵杰

赵争鸣 赵相宾 张浩 张承慧

张彦斌 徐殿国 何湘宁 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘书：刘娟 林春泉

电气自动化新技术丛书

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别是在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了电气自动化新技术丛书编辑委员会，负责组织编辑“电气自动化新技术丛书”。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版“电气自动化新技术丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

电气自动化新技术丛书
编辑委员会

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者的支持下，在前4届编辑委员会的努力下，至今已发行丛书48种50多万册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断地推出介绍我国电气传动自动化新技术的丛书。本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已经出版的丛书，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读，我们对今后新出版的丛书进行了改版，扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书的出版过程中，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持，在此我们对这些单位再次表示感谢。

第5届电气自动化新
技术丛书编辑委员会
2007年12月18日

前 言

电气传动系统采用各类电动机将电能转换成机械能，为机械负载提供源动力，在电动汽车、城市地铁、干线铁路等交通工具中，在冶金、纺织等各工业生产线上，在空调、冰箱等人们的日常生活中等众多领域内发挥着不可替代的作用。

交流电气传动系统采用交流电动机提供负载所需的源动力，它是电机学、交流电动机调速理论、自动控制理论、电力电子技术、微电子技术等学科的有机结合与交叉应用。自 20 世纪 70 年代以来，随着上述学科技术的日渐成熟，加之交流电动机在体积、重量、维修量、可靠性、效率等方面优于直流电动机，目前电气传动系统已基本上从直流电气传动系统转为交流电气传动系统，并正处于从传统电动机向新型电动机过渡的阶段。

近些年来，交流永磁电动机，特别是永磁同步电动机，已经在广受瞩目的电动汽车中得到了较多的应用，并且在新能源开发与利用、铁道与城市轨道交通等领域也崭露头角。由于在体积、重量、效率等方面有较大优势，相信在不久的将来，交流永磁电动机的应用将会更加普及。

为配合交流永磁电动机应用发展趋势以及便于读者理解和掌握，本书围绕交流永磁电动机变频调速系统，从理论阐述、仿真分析和应用解析 3 个层面进行阐述，力争做到理论结合实际。本书首先对构成该系统的各基本要素——交流永磁电动机、电压型逆变器、交流电动机控制策略等内容进行分章阐述，然后从应用角度针对具体实例进行了解析。详细内容如下：

第 1 章简要地概括了交流永磁电动机的发展历程、控制原理与研究方法。第 2 章讨论了交流永磁电动机的数学模型及其简化、电动机的各种运行特性曲线、电动机的仿真建模；同时对电动机有限元分析软件 FLUX 进行简述。第 3 章分析了电压型逆变器的工作原理、SPWM 与 SVPWM 控制技术，并给出了基于数字信号处理器（DSP）的控制算法实现及相关实验。第 4 章分析了永磁同步电动机的磁场定向矢量控制技术，研究了全速范围内的优化控制技术。第 5 章针对交流永磁电动机的直接转矩控制技术进行了分析，对永磁同步电动机的转矩脉动进行分析，以此为基础讨论了三种改善系统性能的技术方案。第 6 章针对基于 DSP 的数字控制交流永磁电动机变频调速系统实例进行了详细解析，给出了相应的实验波形。第 7 章针对实际系统运行中存在的一些问题进行了分析，探讨了相应的解决办法。书末的附录给出了部分仿真实例，便于读者通过仿真加深对交流变频调

速系统的理解。

本书由袁登科编著，陶生桂教授（博导）进行统稿和审定。在此，作者特别感谢上海大学的阮毅教授（博导），他为本书的内容结构提出了宝贵的意见；感谢上海电驱动有限公司张舟云高工和上海 SoftWave 公司姚海兰高工，他们为本书的编写提出了宝贵的意见。同时非常感谢机械工业出版社的林春泉编辑及其同事们。最后，作者对家人及同事等给予的帮助表示感谢。

本书适合高等院校电气工程及其自动化专业本科生、研究生以及从事交流电气传动的工程技术人员参考使用。

本书作者长期从事电力电子与交流传动的教学和研究，但由于学识、经验和水平有限，书中难免会出现不当之处，敬请广大读者批评指正，并给予谅解。邮箱为：ywzdk@163.com。

作者

2011年2月于连城冠豸山

缩略语及变量符号

AC: 交流	I_{lim} : 电流最大值
BLDCM: 无刷直流电动机	L_m : 定子绕组互感最大值
CHBPWM: 电流滞环脉冲宽度调制	L_s : 定子绕组自感最大值
CDTC: 传统直接转矩控制	L_d : 定子 d 轴电感
DC: 直流	L_q : 定子 q 轴电感
DSP: 数字信号处理器	n_p : 电动机极对数
DTC: 直接转矩控制	R_1 : 定子一相电阻
FOC: 磁场定向控制	R_{rion} : 电动机铁耗电阻
GTO: 门极关断晶闸管	T_e : 电动机电磁转矩
IGBT: 绝缘栅双极型晶体管	T_1 : 电动机的负载转矩
IDTC: 改进型直接转矩控制	U_d : 直流电压
IPM: 内嵌式永磁电动机	U_{lim} : 电压最大值
MOSFET: 金属氧化物半导体场效应晶体管	u_1 : 定子电压矢量
MTPA: 最大转矩/电流	u_{1m} : 定子电压矢量幅值
PMSM: 永磁同步电动机	u_d : 定子电压 d 轴分量
PWM: 脉冲宽度调制	u_q : 定子电压 q 轴分量
SPWM: 正弦脉冲宽度调制	Ψ_f : 转子永磁体匝链到定子绕组的磁链
SVPWM: 空间矢量脉冲宽度调制	Ψ_d : 定子磁链 d 轴分量
VVVF: 变压变频	Ψ_q : 定子磁链 q 轴分量
i_1 : 定子电流矢量	θ : 转子电角位置
i_{1m} : 定子电流矢量幅值	θ_m : 转子机械角位置
i_d : 定子电流 d 轴分量	ω : 转子电角速度
i_q : 定子电流 q 轴分量	ρ : 电动机的凸极率

目 录

电气自动化新技术丛书序言

第5届电气自动化新技术丛书编辑委员会的话

前言

缩略语及变量符号

第1章 绪论	1
1.1 电动机类型概述	1
1.2 电动机应用概述	2
1.3 电动机控制策略	3
1.4 电动机调速系统的研究方法	8
第2章 交流永磁电动机数学模型与仿真建模	9
2.1 交流永磁电动机物理模型	9
2.2 交流永磁电动机统一化动态数学模型	10
2.2.1 定子电压方程	10
2.2.2 定子磁链方程	10
2.2.3 电动机转矩方程	13
2.2.4 运动方程	15
2.3 PMSM 动态数学模型与仿真建模	15
2.3.1 坐标变换与变换矩阵	15
2.3.2 转子磁场坐标系 PMSM 动态数学模型	17
2.3.3 电动机运行特性曲线	18
2.3.4 PMSM 仿真建模	24
2.4 BLDCM 数学模型	38
2.4.1 BLDCM 工作原理	38
2.4.2 ABC 坐标系 BLDCM 动态数学模型	40
2.5 电动机有限元分析软件 FLUX	42
2.5.1 FLUX 概述	42
2.5.2 电动机磁场分析简介	43
2.6 小结	45
第3章 电压型逆变器控制技术及其仿真建模	46
3.1 电压型逆变器的工作原理	46
3.1.1 电压型逆变器的电路结构	46
3.1.2 能量传递的三种方式	48

3.1.3	两种工作模式	48
3.1.4	方波运行工况	49
3.2	电压型逆变器建模	50
3.2.1	简单仿真模型	50
3.2.2	详细仿真模型	52
3.3	电压型逆变器 PWM 控制技术	54
3.3.1	SPWM 技术	54
3.3.2	SVPWM 技术	59
3.3.3	SVPWM 算法的仿真建模	64
3.3.4	基于 DSP 芯片的 SVPWM 算法	78
3.4	小结	89
第 4 章	PMSM 磁场定向矢量控制变频调速系统	90
4.1	PMSM 磁场定向矢量控制理论	90
4.1.1	FOC 控制技术思路	90
4.1.2	不同速度范围下 PMSM 的运行分析	92
4.1.3	全速范围内 PMSM 的优化控制技术	95
4.2	PMSM 磁场定向矢量控制调速系统建模与仿真	98
4.2.1	PMSM 磁场定向矢量控制调速系统建模	98
4.2.2	调速系统的仿真分析	100
4.3	小结	105
第 5 章	PMSM 直接转矩控制变频调速系统	106
5.1	直接转矩控制技术原理	107
5.1.1	两电平电压型逆变器的电压空间矢量	108
5.1.2	定子磁链控制原理	108
5.1.3	电动机转矩控制原理	110
5.1.4	两种磁链轨迹控制方案	111
5.2	PMSM 直接转矩控制变频调速系统分析	113
5.2.1	PMSM 直接转矩控制变频调速系统结构	113
5.2.2	调速系统的仿真建模	115
5.2.3	调速系统的仿真结果	118
5.3	PMSM 直接转矩控制变频调速系统性能改善方案	122
5.3.1	直接转矩控制系统中 PMSM 转矩增量分析	122
5.3.2	传统 DTC 调速系统中 PMSM 转矩脉动分析	123
5.3.3	传统 DTC 调速系统性能改善方案	127
5.4	小结	134
第 6 章	PMSM 数字控制变频调速系统实例解析	136
6.1	数字控制变频调速系统的构成	136
6.1.1	主电路	136

6.1.2	控制电路	142
6.1.3	信号调理电路	145
6.1.4	转子位置检测电路	145
6.2	DSP 控制软件	148
6.2.1	DSP 资源分配	148
6.2.2	控制软件流程图	149
6.2.3	转子位置与速度计算	152
6.2.4	坐标变换	153
6.2.5	PI 调节器	153
6.3	实验结果	156
6.3.1	驱动电路实验	156
6.3.2	转子位置检测电路实验	158
6.3.3	SVPWM 单元实验	159
6.3.4	转子定位实验	160
6.3.5	电流实验波形	161
6.4	小结	161
第 7 章	PMSM 变频调速系统性能改善方法	162
7.1	PMSM 变频调速系统实际运行情况分析	162
7.1.1	DSP 数字控制系统	162
7.1.2	数字控制系统对变频调速系统性能的影响	163
7.2	控制系统存在的问题	170
7.2.1	反馈变量的采样	170
7.2.2	电动机参数的变化	170
7.2.3	控制系统的闭环调节器	173
7.3	提高调速系统性能的方法	175
7.3.1	新型控制方案简介	175
7.3.2	新型控制方案的控制原理	175
7.3.3	新型控制方案抑制扰动的仿真分析	177
7.4	小结	177
附录		179
附录 A	SIMULINK 分立模块搭建的 PMSM 仿真模型	179
附录 B	S-FUNCTION 实现 PMSM 仿真建模的程序	182
附录 C	命令文件	186
附录 D	中断向量文件	187
附录 E	硬件法实现 SVPWM 算法的程序代码	191
参考文献		203

第1章 绪 论

本章对电动机的类型、应用场合及其控制策略进行简要介绍，并对电动机的变频调速系统常用的研究方法——计算机仿真、基于微控制器的实时控制系统以及半实物仿真系统等进行简述。

1.1 电动机类型概述

电动机是一个集电、磁、机械、力、热等于一体的复杂物理实体，所以电动机的研究是一个多物理域内的研究工作。本书从应用的角度，主要对电动机变频调速方面的内容进行阐述。

从运行原理上说，电动机运行是基于法拉第电磁感应原理；电与磁是电动机内部两个最重要的物理现象。

从组成材料上来说，电动机包含导磁材料（如直流电动机转子硅钢片、定子铸铁等材料）、导电材料（主要是铜铝等材料）以及绝缘材料（如直流电动机换向片之间的云母）等。

从结构上来说，电动机包含有定子与转子两大部分。有的电动机定子在外侧，转子在内侧；而有的电动机则正相反。有的电动机定、转子只有一套，而有的电动机定子或者转子则有两套。

电动机种类繁多，分类方法也是多种多样。大部分情况下可以按照电动机工作时所需的是直流电还是交流电分为直流电动机与交流电动机，如图 1-1 所示。

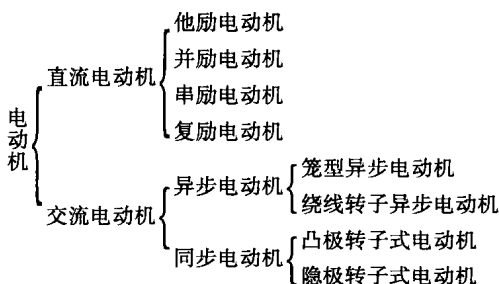


图 1-1 电动机分类图

直流电动机根据励磁绕组与电枢绕组的联结方式分为：他励直流电动机（包括电励磁与永磁）、并励直流电动机、串励直流电动机以及采用两套励磁绕组的复励直流电动机。电动机的励磁源可以是电励磁，也可以是永磁励磁，近年来出现了两者的混合励磁。

交流电动机大体上可以分为交流异步电动机与交流同步电动机。前者带负载运行时，电动机转子速度与旋转磁场同步速度不相等，又称为感应电动机，有笼型异步电动机与绕线转子异步电动机之分。两者的不同之处在于转子的结构，后者通过改变转子回路参数可以获得较好的起动与调速特性。交流同步电动机稳定运行时，转子速度始终与气隙旋转磁场速度保持同步。交流同步电动机按转子结构的不同可分为凸极式与隐极式电动机，按照励磁方式的不同则可以分为电励磁、永磁式同步电动机以及近年来出现的混合励磁型同步电动机。

随着现代电子技术的发展，出现了一些结构与传统电动机结构大不相同的新型电动机，如永磁步进电动机、开关磁阻电动机等。这些电动机在工作时必须配以相应的电子装置，从而构成了电子式的电动机。例如配备有位置传感器以及电子换向器的无刷直流电动机（Brushless Direct Current Motor, BLDCM）。从内部运行规律来说，BLDCM 属于交流同步电动机，因而本书将其归类为交流电动机中的同步电动机。

本书的研究对象是交流永磁电动机，具体是指交流同步电动机中采用永久磁铁励磁的电动机，根据气隙磁场的不同划分为正弦波与梯形波两类，前者通常称为永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM），后者通常称为 BLDCM。

1.2 电动机应用概述

不同类型电动机的运行特性不同，因而它们分别适用于不同的应用场合。

在 20 世纪 70 年代以前，由于交流电动机调速系统复杂，调速性能又无法与直流电动机调速系统相比，因而一直存在这样的格局：直流电动机在电气牵引、生产加工等调速领域内占据霸主地位；交流电动机通常用于基本上无需调速的场合，例如各种风机、水力发电等。但是交流电动机自身优点众多：结构简单、重量轻、体积小、基本无需维护、单机的速度与功率都可以做得很大，所以当交流电动机现代调速理论、电力电子技术、微型处理器及微型控制器技术发展起来后，从 20 世纪后期 20 ~ 30 年到目前经历了一个电气传动交流化的浪潮。目前，交流电气传动已经占有统治地位，并将在更多场合中进一步取代直流电气传动。

以电动客车为例，它对调速性能有较高的要求。早期的电动客车采用直流传动系统。当交流电动机矢量控制系统发展起来后，采用磁场定向矢量控制技术的交流异步电动机调速系统具有了良好的调速性能，加之电动机本身的优点，因而迅速地在电动客车上取得了应用。而目前交流永磁电动机有更高的效率、更大的功率体积比，所以采用高性能控制技术的交流永磁电动机在电动客车上的应用成为近年来该领域内的研究热点之一。因此，本书选取采用永久磁铁励磁的 PMSM 与 BLDCM 作为本书的研究对象。

1.3 电动机控制策略

直流电动机的控制方法较简单且成熟，其中调节电枢回路电阻最为简单，但是它属于有级调速，并且耗能较多。后来发展到调节电枢电压调速，电动机的调速性能好，属无级调速，但是需要较为复杂与昂贵的调压装置，其中可以采用的调压装置有旋转变流机组、晶闸管相控整流系统、直流 PWM 斩波系统等；当电动机运行在额定电压且需要进一步提高速度时就需要采用削弱主磁场的方式进行弱磁调速。

交流异步电动机的调速方法众多，大体上可以根据转差功率的不同分为转差功率消耗型、转差功率回馈型和转差功率不变型三类。第一类方法在早期通常采用，例如调节定子电压调速（利用调压装置或者 Y/ Δ 调速）、调节定子回路或者转子回路电阻、电感等参数调速等，这种方法调节输出功率是通过调节转差功率来实现的，效率较低，现在在大部分场合都不采用了。但是，在调速要求较低场合可以采用晶闸管实现调压（或调功）调速，可以避免起动时产生较大的电流冲击，相应的产品称为电子式软启动器；同时根据负载的不同进行简单的电压调节，可以起到提高运行效率的作用。转差功率回馈型交流调速系统主要是串级调速，通过将部分转差功率进行反馈，回送到电网从而可以提高系统效率。而转差功率不变型调速系统主要是变极调速（有级）与变频调速（无级），此时转差功率基本不变，随着输出功率的变化，系统从电网吸收的有功功率也随之变化，始终保持较高的运行效率，并且调速性能也最好。

交流同步电动机稳态运行时不存在转差，因而只能通过改变主磁场的运行速度来进行调速——改变电动机磁极数目（有级）或者改变定子频率（无级变频调速）。

交流电动机变频调速已经广泛应用于各种场合，本书中交流永磁电动机的控制就是围绕变频调速展开的。

电动机运行的基本问题（电与磁之间的相互作用）在电动机的控制过程中必须得到很好的处理。由于导磁材料存在磁饱和现象，所以希望电动机的磁路工作点处于轻度饱和状态，以便充分利用导磁材料。这样在较大磁场的基础上，相同的电流流过导体就可以有更大的作用力产生。这种控制方法是通过定子电压（ U ）与定子频率（ f ）之比（即压频比、伏赫比）保持恒定来实现的，如图 1-2 所示，在较低频率范围内，随着定子频率的增加，定子电压随之成比例的上升。

而当定子频率上升到一定阶段（图中 f_1 ）时，定子电压由于绝缘或者受到

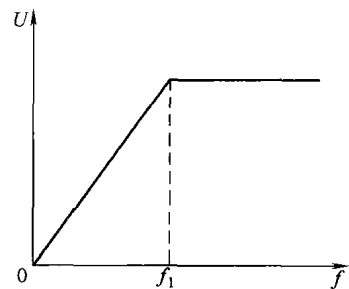


图 1-2 交流电动机变频调速电压与频率的关系

供电电源的限制不能继续上升，那么压频比就不能保持恒定了。在定子电压恒定的情况下，定子频率继续上升，磁场逐渐减小，电动机的转速仍可以进一步增加——这就是弱磁升速（与直流电动机相类似）。

进行变频调速的交流电气调速系统可以采用开环控制也可以采用闭环控制。同步电动机在开环控制状态下较易产生失步，从而导致系统的不稳定。这一点可以在第2章中正弦波供电永磁同步电动机的仿真中得到验证。为了提高系统的稳定性，同步电动机通常采用图1-3所示的自控式变频控制技术——利用转子位置传感器获取的转子位置信号经过运算得到电动机转子的电角位置以及电角速度，然后根据运行指令的要求（电动机转矩、磁链等），由控制系统通过主电路对电动机的位置、速度和电流等实施闭环控制。

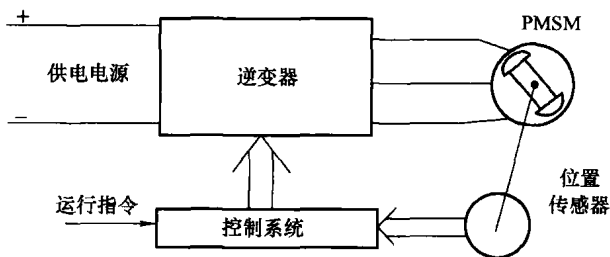


图 1-3 永磁同步电动机自控式变频调速系统框图

从运行特性上来说，正弦波 PMSM 与传统的电励磁同步电动机没有太多的区别。只不过传统电励磁同步电动机可以通过励磁电流的调节使电动机工作在过励磁与欠励磁的状态，从而可以改变电动机与外界的无功功率交换，用以调节功率因数，同时可以进行弱磁升速的控制；而永磁同步电动机气隙磁场的调节只能通过定子电流中通入额外的弱磁电流以抵消转子永久磁铁在气隙中产生的磁场从而进行弱磁升速。

早期的 PMSM 主要是表面贴装式结构，如图 1-4a 所示。由于永磁体的磁导率与空气相差无几，所以电动机 d 、 q 轴磁路是对称的 ($L_d = L_q$)，此时电动机相当于传统电励磁同步电动机中的隐极同步电动机。控制中根据转子位置确定定子电流矢量的相位（电流矢量超前转子位置 90° 电角度），定子电流幅值 i_{1m} 根据转矩命令的大小确定，见下式：

$$i_{1m} = \frac{T_e}{1.5n_p \Psi_f}$$

研究发现，如果转子永磁体采用内嵌式的结构，那么磁路将呈现出不对称（见图 1-4b），从而等效于传统电励磁同步电动机中的凸极同步电动机。不过此时有 $L_d < L_q$ ，这与传统电励磁同步电动机不同。在电动机控制过程中，如果通入沿 d 轴的负向励磁电流（即弱磁电流），一方面可以进行弱磁升速，另一方面

又可以增加一个磁阻转矩分量，提高了功率密度，所以电机的弱磁控制技术目前研究较多，该类型电动机在电动汽车等需要大功率输出的场合中得到了越来越广泛的应用。另外，近年来又出现了磁体分段式转子结构，不同部分的转子呈现出不同的特性，以便使整体性能得到进一步提升。

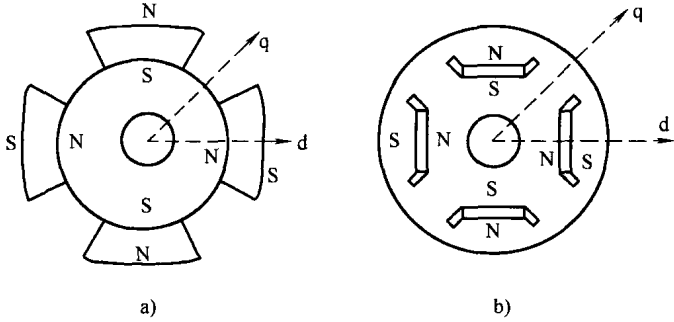


图 1-4 表面式与内嵌式 PMSM 转子结构

BLDCM 在运行特性上与传统同步电动机有较大区别。从发展历程上来说，在 BLDCM 出现之前，首先出现的是无换向器电动机，可以说它是 BLDCM 的雏形。无换向器电动机转子励磁产生的依然是正弦分布的磁场，而定子绕组采用电流源逆变器供电，通过循环切换逆变器主开关向定子绕组中通以正负半周各自导通 120° 电角度、三相互差 120° 的直流电流（见图 1-5b）。在这种情况下，电动机可以产生有效的平均转矩；但是由于反电动势为正弦波（见图 1-5a），而定子电流为直流，所以存在着较大的转矩脉动（见图 1-5f 中的三相合成转矩）。

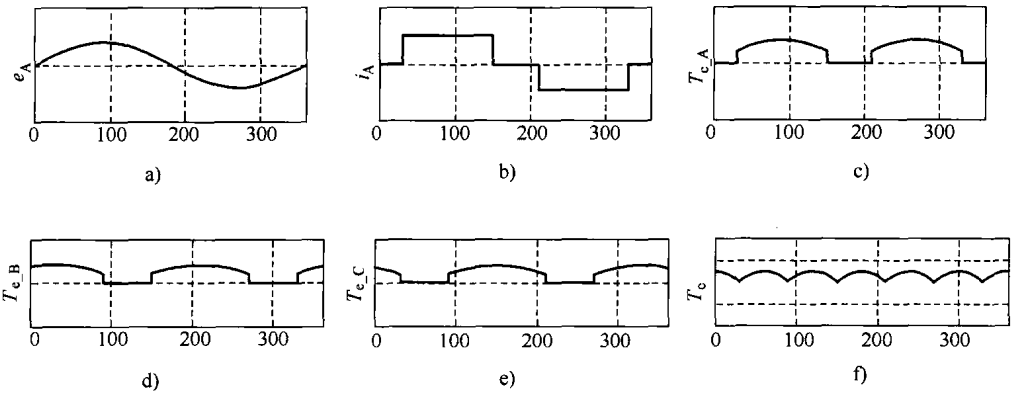


图 1-5 无换向器电动机的电压、电流、转矩波形示意图

各种围绕减小转矩脉动的研究展开之后，出现了气隙磁场为梯形波（类似于直流电动机的主磁场）的同步电动机——BLDCM，图 1-6b 所示的梯形波气隙磁场可以通过优化永久磁钢形状产生。