

交流调速系统的控制策略

苏彦民 李宏 编著

JIAO LIU TIAO SU
XI TONG DE
KONG ZHI CE LUE

交流调速系统的控制策略

苏彦民 李宏 编著

机



机械工业出版社



TM340.12

S89

412438

交流调速系统的控制策略

苏彦民 李 宏 编著



机械工业出版社

本书跟踪国内外交流调速理论和技术的最新研究成果,内容包括交流电动机的矢量变换控制、直接转矩控制以及近代控制理论和智能控制在交流电动机控制中的应用。

本书内容丰富,论述清晰,理论联系实际,可以作为高等工科院校电工学科和控制理论与工程学科有关专业硕士研究生或本科生的教材,也可作为从事交流调速技术研究和开发的工程技术人员的参考书。

DM44/30

图书在版编目 (CIP) 数据

交流调速系统的控制策略/苏彦民,李宏著. —北京:机械工业出版社,1998.2
ISBN 7-111-06062-8

I. 交… I. ①苏… ②李… II. 交流电机-调速-高等学校-教材 N. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 28635 号

出版人 马九荣 (北京市百万庄路 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:于苏华

封面设计:王晓青

北京奥隆印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·7.75 印张·205 千字

印数:0001—1200 册

定价:16.00 元

前 言

随着电力电子技术的迅猛发展和交流电动机控制技术研究的不断深入,交流电动机的调速性能已经可以与直流电动机相媲美,交流调速系统的应用越来越普遍。为了比较全面地介绍国内外交流调速理论和技术的最新研究成果,根据有关参考文献和我们多年来从事交流调速系统与策略的研究体会,编写了这本书,并取名为《交流调速系统的控制策略》。

本书的初稿曾作为西安交通大学电机专业、电力电子技术专业和工业自动化专业硕士研究生的讲义使用了三届。在编写时遵循“跟踪发展,精选内容,注重理论,联系实际”的原则,力求“由浅入深、层次清晰、叙述准确”,以便于自学。

本书可以作为高等工科院校电工学科和控制理论与工程学科有关专业硕士研究生或本科生讲授“现代交流调速”等课程的教材,也可作为从事交流调速技术研究和开发的工程技术人员的参考书。

本书由西安交通大学苏彦民教授为主编写,西安石油学院的李宏高级工程师编写了部分章节。在编写过程中,编者对书末所列参考文献作了不少借鉴。在本书出版之际,特向所列参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于水平所限,错误或不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1997年4月

目 录

前言

绪论	1
第一章 异步电动机的矢量变换控制	6
第一节 坐标变换	6
第二节 异步电动机的数学模型	9
第三节 矢量变换控制原理	16
第四节 转子磁链观测器	22
第五节 矢量控制系统举例	24
第二章 异步电动机的直接转矩控制	29
第一节 定子电压矢量与定子磁链的关系	29
第二节 直接转矩控制的基本原理	32
第三节 弱磁工作范围的控制方式	38
第四节 正/反向运行的控制	41
第五节 圆磁链轨迹的控制	42
第六节 反向电压矢量的应用	45
第三章 异步电动机的其他控制策略	48
第一节 非线性反馈解耦控制	48
第二节 前馈解耦控制	52
第三节 针对转子电阻变化的自适应控制	55
第四节 不用速度传感器的矢量控制系统	60
第五节 滑模变结构控制	62
第六节 模糊控制	69
第七节 转差频率控制变频调速系统	72
第四章 同步电动机的矢量变换控制	76
第一节 同步电动机的矢量图	76
第二节 矢量变换控制的基本构想	77
第三节 定子电流和定子电压控制	80
第四节 励磁电流控制	83
第五节 气隙磁链控制	86
第六节 功率因数控制	89
第七节 转子位置角检测	91
第八节 转速控制	92
第五章 同步电动机的其他控制策略	95
第一节 无换向器电动机控制系统	95
第二节 永磁同步电动机控制系统	103
第三节 开关磁阻电动机控制系统	107
参考文献	115

绪 论

1885 年, 世界上第一台交流电动机问世。

交流电动机, 特别是笼型异步电动机, 结构简单, 坚固耐用, 价格便宜, 不需要经常维修, 应用十分广泛。但是, 尽管笼型异步电动机较直流电动机只晚一年问世, 但直到本世纪 70 年代, 凡是要求调速范围广, 速度控制精度高, 动态响应性能好的场合, 几乎全都采用直流电动机调速系统。交流电动机, 特别是笼型异步电动机和同步电动机则主要用于不需要变速的电力传动系统中。其原因是:

(1) 不论是异步电动机还是同步电动机, 唯有改变定供电频率调速最为方便, 而且可以获得优良的调速特性。而大容量的变频电源却在长时期内没有得到很好的解决。

(2) 异步电动机和直流电动机不同, 它只有一个供电回路——定子绕组, 这就使得它的速度控制比较困难, 不像直流电动机那样通过控制电枢电压或控制励磁电流均可方便地控制电动机的转速。从电动机的运动方程式

$$T_e - T_1 = J \frac{d\omega}{dt}$$
$$\theta = \int \omega dt + \theta_0$$

可知, 对电动机转子角速度 ω 的控制或对转子转角 θ 的控制, 归根结底是要对电动机的电磁转矩进行有效的控制。直流电动机的工作原理可用图 0-1 加以说明。如果不计磁路饱和的影响, 且用矢量 Φ 表示气隙磁通在空间的位置, 用矢量 I 表示电枢电流矢量 (电枢磁动势矢量) 在空间的位置, 则电磁转矩为

$$T_e = K_T \Phi \times I = K_T \Phi I \sin 90^\circ = K_T \Phi I$$

式中, K_T 为一常数。可见, 直流电动机电磁转矩的控制可以分别对电 (电枢电流) 和磁 (励磁电流) 进行独立控制, 相互间没有耦合。只要能对电枢电流或励磁电流进行有效的控制, 则电动机的转矩和运动就可以按照规定的规律和稳态、动态响应性能得到控制。交流电动机则不同, 同步电动机的气隙磁通是由电枢电流和励磁电流共同作用产生的, 其值不仅决定于这两个电流的大小, 而且与工作状态有关。而异步电动机的电枢和励磁是同一个绕组, 只有一个供电回路, 简单地控制电枢电压或电流并不能准确地控制气隙磁通和电磁转矩, 从而不能有效地控制电动机的运动规律。

从 1956 年美国贝尔实验室发明硅可控整流器和 1958 年通用电气公司推出硅可控整流器开

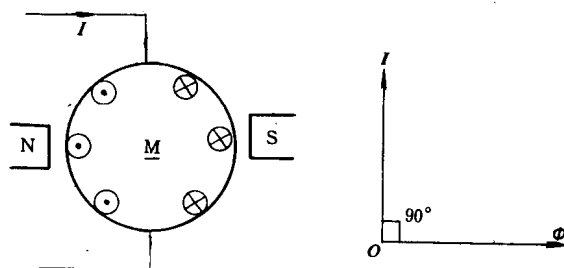


图 0-1 直流电动机示意图

始,由硅可控整流器(Silicon—Controlled Rectifier——SCR)^①组成的交-直-交变频器和交-交变频器(周波变换器),使三相交流电动机由恒频供电改为变频供电成为可能,从而解决了变频调速的电源问题。其后出现的门极关断(Gateturn-Off——GTO)^②晶闸管、大功率晶体管(Bipolar Junction Transistor——BJT)、绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor——IGBT)和功率场效应晶体管 MOSFET 等,由于导通和关断均可控,而且通断时间均较 SCR 大大缩短,使得采用脉冲宽度调制(Pulse Wide Madelateon——PWM)的交-直-交电压型变频器得到迅速的发展和应用,从而使变频器输出波形的质量和响应速度都得到了很大的改善,变频器的容量也在不断地增大。

在交流电动机的控制策略方面,1971 年德国学者 F·Blaschke 发表论文,提出了交流电动机的磁场定向控制(即矢量变换控制)的原理,为高性能的交流传动控制奠定了理论基础。矢量变换控制(Transvictor Control)是以交流电动机的双轴理论为依据,在同步旋转坐标系中把定子电流矢量分解为两个分量:一个分量与转子磁链矢量重合,称为励磁电流分量;另一个分量与转子磁链矢量垂直,称为转矩电流分量。通过控制定子电流矢量在旋转坐标系的位置及大小,即可控制励磁电流分量和转矩电流分量的大小,实现像直流电动机那样对磁场和转矩的解耦控制。

矢量变换控制理论的提出和成功应用,开创了用交流调速系统取代直流调速系统的时代,激发了人们研究高性能交流调速系统的兴趣和热情。80 年代掀起了交流调速热,矢量控制理论进一步完善和发展,矢量控制系统进一步简化与合理,一些新的控制策略和方法相继提出并被采用。1985 年另一位德国学者 Depenbrock 提出了一种异步电动机的直接自控制理论(Direct Self-Control——DSC),通常称为直接转矩控制。直接转矩控制利用观测器观测异步电动机的电磁转矩和定子磁链,采用闭环控制直接控制电磁转矩和定子磁链,不需进行复杂的坐标变换,系统更加简单,控制更加直接,引起人们极大的兴趣。不少学者还把现代控制理论一些成果,例如状态观测器、滑模变结构控制、模型参考自适应控制、模糊控制、非线性反馈解耦控制、逆系统理论与逆系统方法等用于交流传动系统的控制,以获得交流传动系统的高性能。

在控制技术方面,初期的交流调速系统均采用模拟控制器,因为要完成诸如矢量变换等复杂的在线运算,所以电路十分复杂。从 80 年代开始,控制器经历了 8 位微机、16 位微机到 32 位微机和高速数字信号处理器(Digital Signal Processor——DSP)三个阶段的发展,实现了系统的全数字化控制,不但使控制电路大大简化,改善了系统的可靠性、可使用性、可维修性(Reliability、Availability、Serviceability——RAS),而且使交流调速系统的功能更加完善,使用更加方便,以致进入 90 年代后交流电动机及其控制系统正在取代直流电动机成为电力传动系统的主流。

由于控制理论上的突破和电力电子技术的迅猛发展,变频调速装置和交流调速系统的发展十分迅速。纵观 15 年来交流调速技术的发展,可以用一句话来概括,即一代器件更新一代线路,一代线路更新一代装置。其发展概况简述如下。

1. 大容量交流调速系统的发展概况

1980 年 8 月东芝公司为日本大同特殊钢公司星崎钢厂二重式可逆轧机提供的晶闸管交-交变频器供电的笼型异步电动机传动系统投产,额定功率 1800kW,在世界上率先采用矢量变换控制原理实现了大容量交流电动机传动,揭开了大容量、高性能交流传动系统工业应用的序幕。15 年来,大容量交流传动系统的容量不断扩大,性能不断提高,其发展方向是多品种、数字化控制、提高

① 硅可控整流器是美国早期产品名,后 IEC 正式定名为晶闸管(Thyristor),但为方便起见,普通晶闸管仍沿用 SCR 来表示。

② 门极关断晶闸管,简称为 GTO 晶闸管,但为方便起见,往往用 GTO 来表示。

性能指标和扩大单机容量。大容量、高性能交流传动系统主要有下列六种类型：

晶闸管无环流交-交变频器供电的同步电动机 (SM) 传动系统

晶闸管无环流交-交变频器供电的异步电动机 (IM) 传动系统

晶闸管有环流交-交变频器供电的同步电动机传动系统

晶闸管有环流交-交变频器供电的异步电动机传动系统

晶闸管交-直-交电流型变频器供电的无换向器电动机传动系统

GTO 交-直-交电压型 PWM 变频器供电的异步电动机传动系统

(1) 无环流交-交变频器供电的交流传动系统适用于低速大容量场合，像初轧机、厚板轧机、立辊轧机、型钢轧机、钢管轧机、矿井提升机、选矿机、水泥窑设备及船舶主推进器等。采用晶闸管多重化技术，单机容量可以超过 10000kW。例如被称为世界上最大的轧钢机的比利时 SIDMAR 粗轧机，由法国 Alstho 公司提供的无环流交-交变频器同步电动机传动系统，主传动为 $2 \times 12000\text{kW}$ ，额定电压为 5900V，额定转速为 $\pm 58.5\text{r/min}$ ，弱磁运行最高转速为 $\pm 120\text{r/min}$ ，最高工作频率为 12Hz，采用矢量变换控制，从零速到最高速的加速时间仅为 1.2s。又如欧洲 ABB 公司为美国迈阿密轮船公司八艘远洋轮船提供的无环流交-交变频器供电的同步电动机传动系统，每艘船两个主推进器由两台功率均为 14000kW 的同步电动机驱动，最高转速为 140r/min。每台电动机均采用双交-交变频器供电，采用矢量变换控制。

(2) 有环流交-交变频器供电的交流传动系统适用于中高速、大容量、性能要求很高的场合，像带钢冷连轧机、可逆冷轧机、卷取机、热轧厂精轧机等。与无环流系统相比，有环流交-交变频器正、反向两组晶闸管交替工作过程中无零电流死区，速度响应快，转矩脉动小，最高速度高。1992 年 2 月完成现代化改造的新日铁君津钢厂带钢热轧精轧机的七个主传动是世界上首例采用有环流交-交变频器供电的同步电动机传动系统，采用东芝公司技术——全数字化矢量变换控制。七个机架总功率为 70000kW，第一机架为 11250kW、127/360r/min、8.5/24Hz，取代了原来三台直流电动机传动。又如新日铁八幡钢厂冷连轧机交流传动系统采用了笼型异步电动机，单机容量为 6400kW，采用 4000V/1500A 晶闸管组成的交-交变频器和矢量变换控制。

(3) 无换向器电动机是一台同步电动机和晶闸管变流器的总称。无换向器电动机采用自控式变频，变频器可以采用交-交变频器，也可以采用交-直-交电流型变频器。由于交-直-交电流型变频器所用晶闸管数少，耐压要求低，所以得到了广泛应用。采用交-直-交电流型自控式变频器供电的无换向器电动机传动系统适用于高速、大容量场合，像风机、泵类、压缩机以及大型同步电动机的变频起动等。例如 Siemens 公司为美国 Racoon 电站 425MVA 大型扬水发电机配套的 20MVA 无换向器电动机运行方式的起动设备早在 1979 年投入运行。又如法国 Alsthom 公司制造的用于传动裂化气体压缩机的 21MVA、5900r/min 的交-直-交电流型无换向器电动机也于 1984 年投入运行。该公司提供的大容量无换向器电动机的规格中，5000kW 以下的转速可以达到 10000r/min，75000kW 以下的转速可达 4000r/min，电压等级为 600V~15kV。日本也能提供 100kW~50MW/10000~3600r/min 的无换向器电动机交流传动设备。

(4) GTO 电压型 PWM 变频器供电的异步电动机传动系统适用于从低速到高速的中大容量、高性能的应用场合，像造纸机、海洋石油钻机、棒线材轧机、冷轧机及船舶推进器等。其装置容量及性能已经达到：

容量范围：500~8000kW

变频范围：0~50Hz (可达 75Hz)

调速范围：1 : 1000

速度控制精度： $\pm 0.01\%$ （最高转速时）

控制技术：PWM 方式，矢量控制，多 CPU 全数字化控制

例如，日本淀州制铁公司采用的日立公司 GTO 电压型变频器——笼型异步电动机轧机传动系统，采用 4500V/3000A GTO、PWM 方式、全数字化矢量控制，变流器容量为 6210kVA，电动机功率为 3900kW（六极），最高转速为 1000r/min，可以四象限运行。又如 ABB 公司为 Lorelay 号铺管船提供的总功率为 21000kW 的八套 GTO 电压型变频器—笼型电动机传动系统，用于动力定位推力器（定位作业时）和主推进器（船行驶时），转速范围为 0~1800r/min，在整个转速范围内功率因数可达 0.93。

在控制技术方面，新的大容量交流传动系统大都采用多微处理机（CPU）全数字化控制。多 CPU 及高速数字信号处理器（DSP）的应用大大提高了运算和处理速度，不但能够快速完成多任务，而且促使诸如状态观测器、参数估计器、仿真器、非线性解耦等现代控制理论和技术的实用化，大大地提高了系统的控制性能。

2. 中、小容量变频装置的发展概况

习惯上把 600kW 以下的变频调速系统划为中、小容量范围。中、小容量变频装置发展的特点是通用化、系列化和规模化生产。日本是世界上变频器产量最大的国家，中、小容量变频器在中国的市场也最大。以富士、三肯公司最早，其后很多公司的产品也先后进入中国市场。欧美不少厂家的产品也进入了中国市场，如美国的 AB（Allen—Bradley）公司，英国的 CT（Control Techniques）公司，德国的 Siemens 公司，欧洲的 ABB 公司、AEG 公司等。中、小容量变频器几乎全都采用二极管整流，自关断器件（GTR、IGBT）逆变的交-直-交电压型 PWM 变频控制方式，输出正弦波电流。最新的产品全都采用微机全数字化控制。通用化是中、小容量变频器最突出的特点，其表现为：

（1）输出频率范围宽 目前通用变频器的输出频率可达 400Hz 或更高，不但能用于工频电动机的调速，而且可用于中频电动机的调速控制。

（2）高精度和高分辨率 最新的变频器其频率分辨率和控制精度可以达到 0.002Hz，以适应精调速场合的需要。

（3）转差补偿功能 由于采用了 32 位微机或 DSP 高速数字化控制，能够进行瞬时转矩检测和运算，根据负载转矩的大小对转差进行补偿，使异步电动机在速度开环的情况下也能够得到硬特性，以满足要求稳速运行的需要。

（4）转矩提升功能 瞬时转矩检测和控制可使起动时电动机的转矩增加到额定转矩的 150%，以适应像窑炉、起重机等要求大起动转矩设备的需要。

（5）转矩限定功能 通过对转差的控制可将电动机的转矩限定在预置的某一个值，因而在运行中不会因负载突变导致变频器过电流而跳闸。

（6）自动加、减速 利用转矩限定功能，在加、减速过程中可以根据负载转矩的大小自动调整加、减速时间，以免瞬时转差过大或制动过程泵升电压过高而跳闸。

（7）避开某一频率 在起动过程或稳定运行时，可以通过预置而避开在某一频率上运行，以免产生机械共振。

（8）瞬时停电自动再起动 短时间的供电电源故障，由于存在机械惯性，在电源恢复后电动机的转速可能尚未降到零。变频器可以根据电源恢复时电动机的实际转速计算出对应的输出频率，以此频率为起始频率使电动机重新起动并加速到停电前的运行状态，以适应不允许停电设备的需要。

(9) 通信和联网功能 最新的变频器均设有 RS-485、RS-482 等通信接口，以备联网运行。

(10) 参数预置功能 为满足不同用户的需要，各种运行参数均可事先预置。像 V/F 曲线、转矩提升曲线、转矩限定曲线等，一般都有几十种可供选择。起、制动时间的选择范围宽达 0.2~3600s，起、制动曲线可以选择线性加减速，也可选择指数曲线或 S 曲线加减速。转差补偿的程度，即机械特性的硬度也可以预置。一般变频器可预置的参数都有几十种之多，因而可以满足各类传动系统的要求。

通用化的另一表现为系统结构的模块化，即通过更换不同的控制模板可以使通用变频器增加用途而不增加成本。例如西门子公司的 6SE70 系列变频器，主电路采用 IGBT，容量范围为 2.2~1500kW，通过选用不同的控制模板（FC、VC、SC 板），可以使变频器运行于频率控制方式、矢量控制方式、伺服控制方式，而主要的硬件不必改动。

目前，中、小容量变频器正朝着小型化、低噪声、智能化和高性能的方向发展。IGBT 的开关频率可以超过 20kHz，可以使变频器输出电流的谐波很小并实现静音。专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit——ASIC）、现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array——FPGA）以及计算机-电路一体化的智能功率模块（Intelligent Power Module——IPM）器件的应用，使变频器的体积大大缩小。已经制成了将控制器、驱动电路、功率变流器集成为一体的微型变频器，如日本富士公司的 KST 系列和三菱公司的 FR2 系列变频器。美国一家公司最近推出的变频调速电动机已将变频器装入电动机中，成为真正的智能电动机。

第一章 异步电动机的矢量变换控制

本章叙述笼型异步电动机采用矢量变换控制的有关问题,包括笼型异步电动机的数学模型、坐标变换、矢量变换控制的原理、矢量变换控制系统的组成等。

第一节 坐标变换

为矢量变换控制运算作准备,首先推导坐标变换的变换算式。

一、空间坐标系

为了进行矢量变换,必须定义矢量所处的坐标系。异步电动机如果是三相供电,则定子绕组为三相绕组,绕组的磁轴线在空间各差 120° 电角度。以每相绕组的轴线作为一个坐标轴,便可以得到定子三相坐标系,如图 1-1 所示。

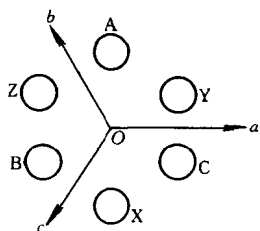


图 1-1 三相坐标系

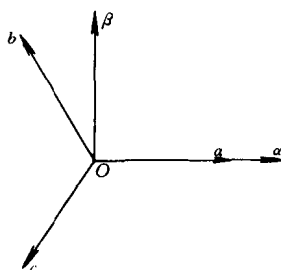


图 1-2 两相坐标系

为了简化数学模型,使模型降价,通常把三相电磁量变换成两相电磁量,即把三相坐标系中的电磁量变换到两相坐标系中进行运算,所以又定义了定子两相坐标系。三相坐标系的三个坐标轴分别用 a 、 b 、 c 表示,两相坐标系的两个坐标轴分别用 α 、 β 表示,通常使 α 轴与 a 轴重合,如图 1-2 所示。

在矢量变换控制系统中,还定义了一个同步旋转坐标系—— d - q 坐标系。它也是一个两相直角坐标系,横坐标轴用 d 表示,纵坐标轴用 q 表示。与 α - β 坐标系不同的是 d - q 坐标系是旋转的,其旋转角速度为定子旋转磁场的角速度(即同步角速度 ω_0),故称为同步旋转坐标系。

如果用 λ 代表同步旋转坐标系的 d 轴与定子静止坐标系 α 轴之间的夹角(见图 1-3),则显然有

$$\lambda = \int \omega_0 dt + \lambda_0 \quad (1-1)$$

式中 λ_0 ——初始位置角。

旋转坐标系有时把横坐标轴用 M 表示,纵坐标轴用 T 表示,称为 M - T 坐标系。

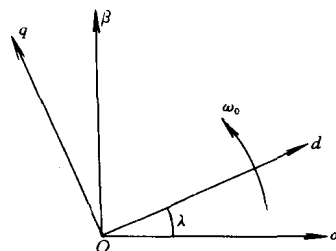


图 1-3 旋转坐标系

二、空间矢量的概念

三相电动机的电压、电流、磁动势、磁链等均是三相电磁量。若在复平面中，能用一个矢量来表示三相电磁量的合成作用，则可将三维物理量变为二维物理量，为分析和计算带来很多方便。为此，引入 Park 矢量变换。

Park 矢量变换是将三个标量变换为一个矢量，这种变换对于时间函数同样适用。若用 V_a 、 V_b 、 V_c 分别表示三相电磁量在三相坐标系中的瞬时幅值，用 V 表示合成作用矢量，则 Park 矢量变换关系为

$$V = \frac{2}{3} [V_a + V_b e^{j2\pi/3} + V_c e^{j4\pi/3}] \quad (1-2)$$

矢量 V 称为 Park 矢量，它代表三相电磁量某一时刻合成作用在坐标系中的空间位置，所以称为空间矢量。

对于三相异步电动机来说，空间磁动势矢量、磁通矢量、磁链矢量是确实存在的，而电流矢量和电压矢量并不存在。但是磁动势与电流密切相关，电压与磁链密切相关，所以仍可以定义电流空间矢量和电压空间矢量，它们分别表示三相电流的合成作用和三相电压的合成作用在坐标系中所处的位置。

把三相电动机的各空间矢量的位置关系画在同一坐标系中，就是三相电动机的空间矢量图，简称矢量图。这里所说的矢量图与电动机学中所说的三相电动机的相量图是不同的，电机学中的相量图描述的是在三相对称正弦波供电情况下，稳态运行时各电磁量之间的相位关系。由于各电磁量均为三相对称正弦量，所以相量图表示的是一相的电磁量。而矢量图描述的是三相电磁量某一时刻合成作用在坐标系中的位置关系，因而三相电磁量可以是正弦量，也可以是非正弦量，可以是对称的，也可以是不对称的。可见，矢量图不仅可描述稳态运行时各电磁量之间在空间的位置关系，而且可以描述动态过程各电磁量之间在空间的位置关系。矢量变换控制就是对这些空间矢量进行变换而实现对交流电动机的有效控制，使其达到稳态运行和动态过程高性能指标。

三、坐标变换

在进行矢量变换控制时，要对矢量进行一系列的坐标变换，其中包括静止坐标系与旋转坐标系之间的变换；三相坐标系与两相坐标系之间的变换；极坐标与直角坐标系中的变换等。现推导这些变换公式。

(一) 旋转坐标系与静止坐标系间的变换

现以电流矢量 I 为例，推导其变换式。在图 1-4 中，旋转坐标系的横坐标和纵坐标分别用 d 和 q 表示，电流矢量 I 在静止坐标系中的两个分量分别为 i_α 和 i_β ，在旋转坐标系中的两个分量分别为 i_d 和 i_q ， d 轴与 α 轴的夹角用 λ 表示，从图可以看出有如下关系

$$\begin{cases} i_\alpha = i_d \cos \lambda - i_q \sin \lambda \\ i_\beta = i_d \sin \lambda + i_q \cos \lambda \end{cases}$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda \\ \sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 即为由旋转坐标系向静止坐标系变换的算式。

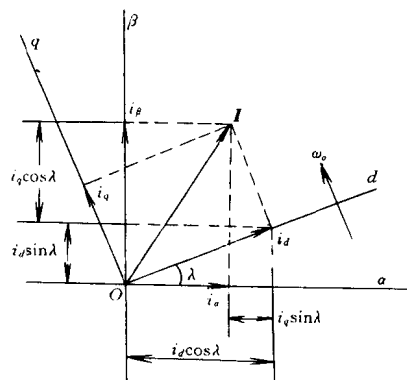


图 1-4 坐标变换

式 (1-3) 中变换矩阵的逆矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda \\ \sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\lambda & \sin\lambda \\ -\sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

由式 (1-3) 及式 (1-4) 可以得到

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\lambda & \sin\lambda \\ -\sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 即为由静止坐标系向旋转坐标系变换的变换算式。

(二) 三相与两相坐标系之间的变换

前面已谈及, 三相电流可以是对称的, 也可以是不对称的, 可以是正弦量, 也可以是非正弦量。现分别用 i_a 、 i_b 、 i_c 表示三相电流的瞬时值, 它们的作用在三相坐标系中的位置如图 1-5 所示。三相电流的合成作用用矢量 I 表示, I 在 α - β 坐标系中的两个分量分别用 i_α 、 i_β 表示, 从图 1-5 可以看出如下关系

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \\ i_\beta &= \frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \end{aligned} \right\}$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

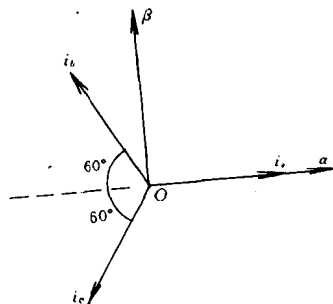


图 1-5 三相/两相变换

式 (1-6) 即为由三相向两相变换的算式。

为了对式 (1-6) 中的变换矩阵求逆, 引入一个零序电流 i_0 , 并令

$$i_0 = i_a + i_b + i_c \equiv 0$$

由于 $i_0 \equiv 0$, 所以在变换矩阵中的相应元素可以取任意值, 现把式 (1-6) 变为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

上式的变换矩阵的逆矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (1-18)$$

对式 (1-7) 两边左乘式 (1-8) 可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

再令上式中 $i_0=0$ ，便可得到

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 即为由两相向三相变换的变换算式。

(三) 直角坐标与极坐标之间的变换

设电流矢量与 α 轴的夹角为 θ ，在静止坐标系中的两个分量为 i_α 和 i_β ；与 d 轴的夹角为 θ_1 ，在旋转坐标系中的两个分量为 i_d 和 i_q ，如图 1-6 所示，显然有

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \\ \theta &= \arctg \frac{i_\beta}{i_\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \\ \theta_1 &= \arctg \frac{i_q}{i_d} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= I \cos \theta \\ i_\beta &= I \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

$$\left. \begin{aligned} i_d &= I \cos \theta_1 \\ i_q &= I \sin \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

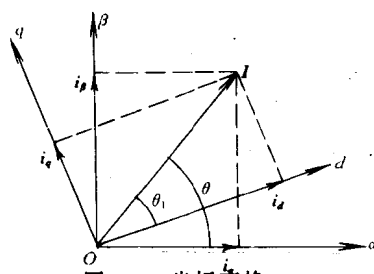


图 1-6 坐标变换

第二节 异步电动机的数学模型

异步电动机的数学模型包括磁链方程、电压方程和转矩方程三部分。

一、磁链方程

在电机学中，等效电路和相量图是分析和计算异步电动机性能的有力工具。在给定电动机参数和电源电压的情况下，则电动机的转速、转矩、电流、损耗和功率等物理量均可以求出。等效电路是把转子绕组经过归算后根据一相电磁量之间的关系列出的。相量图则是反映一相电磁量之间的相位关系，即把每一个电磁量用一个相量表示，依照它们之间的相位关系画在一个平面坐标内。其所以可以用一相电磁量来分析三相电动机，是因为所有电磁量都是对称的三相正弦函数，在稳态时，其他两相电磁量均可由第一相电磁量求出。也就是说，三相电磁量合成作用的计算可以用一个电磁量的计算来代替，使计算和分析得以简化。

当异步电动机由电力电子变频器供电时，定子电压通常不是正弦电压，在动态三相电压也不一定对称，而矢量变换控制正是要对动态响应进行有效的控制，因而再用相量图进行分析和计算

显然是不行的。为此，前文提出了空间矢量的概念，即把交流电动机三相电磁量的合成作用用一个空间矢量表示。在以后的叙述中，对于异步电动机定子侧的电磁量均标以下角 1，对于转子侧的电磁量均标以下角 2，气隙电磁量则标以下角 m。

对于异步电动机来说，有些空间矢量是确实存在的，例如磁动势、磁通、磁链，而有些空间矢量在空间并不存在，例如电压矢量和电流矢量。其所以定义电压矢量和电流矢量，一方面是出于数学推演的需要，另一方面是由于电流矢量与磁动势矢量相差一个标量系数，可以用电流矢量代替磁动势矢量的作用。而电压矢量与磁链矢量密切相关，磁链矢量的分析和计算可以转化为对电压矢量的分析和计算。从这个角度来讲，也可以说电压矢量和电流矢量是存在的。

从电机学知，三相异步电动机定子绕组接三相对称电压后，定子电流将产生旋转磁动势和旋转磁通，这个磁通既与定子绕组匝链，又穿过气隙与转子绕组匝链。由于磁通是旋转的，所以在定子绕组和转子绕组中均会产生感应电动势。对于笼型异步电动机或短路环短接的绕线转子异步电动机，转子感应电动势将产生转子电流。同样地，转子电流也会产生旋转磁动势和旋转磁通，转子电流产生的磁通既与转子绕组匝链，也穿过气隙与定子绕组匝链。可见，异步电动机工作时定子绕组匝链的磁通、转子绕组匝链的磁通和气隙磁通都是定子电流和转子电流共同产生的。

定子绕组匝链的磁通与定子绕组匝数的乘积称为定子磁链，用 ψ_1 表示，转子绕组匝链的磁通与转子绕组匝数的乘积称为转子磁链，用 ψ_2 表示，气隙磁链则用 ψ_m 表示。如果用 I_1 表示三相定子电流合成矢量在坐标系中的位置， I_2 表示转子电流合成矢量在坐标系中的位置， ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_m 分别表示定子磁链矢量、转子磁链矢量和气隙磁链矢量在坐标系的位置，由于磁链可以表示成电感与电流的乘积，所以上述磁链和电流之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= L_{11}I_1 + L_m I_1 + L_m I_2 \\ \psi_2 &= L_{22}I_2 + L_m I_2 + L_m I_1 \\ \psi_m &= L_m I_1 + L_m I_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式中 L_{11} ——定子绕组的漏电感；
 L_{22} ——转子绕组的漏电感；
 L_m ——定、转子绕组之间的互感。

用 L_1 表示定子绕组全电感， L_2 表示转子绕组的全电感，即令

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L_{11} + L_m \\ L_2 &= L_{22} + L_m \end{aligned} \right\}$$

则式 (1-14) 可以写成

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= L_1 I_1 + L_m I_2 \\ \psi_2 &= L_2 I_2 + L_m I_1 \\ \psi_m &= L_m I_1 + L_m I_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式 (1-14) 和式 (1-15) 即为异步电动机的磁链方程式。把上述各电流矢量和磁链矢量的位置关系画在静止坐标系中，如图 1-7 所示。

由于定子漏电感 L_{11} 通常只占定子全电感的 2%~5%，所以在工程应用中为简化分析和计算，可令 $L_{11}=0$ ，则磁链方程变为

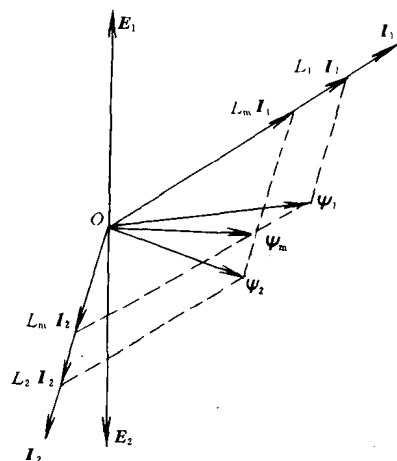


图 1-7 磁链矢量图

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \psi_m = L_m I_1 + L_m I_2 \\ \psi_2 &= L_m I_1 + (L_{22} + L_m) I_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

即近似认为定子磁链与气隙磁链相等。

二、电压方程

三相异步电动机定子三相绕组均有电感和电阻，如果把转子也视为三相绕组，也存在电感和电阻，则至少有六个电磁时间常数。加之动态过程的强耦合和非线性，异步电动机的电压方程将是十分复杂的。为了简化三相电动机的数学模型，人们通过三相/两相变换，把三相电动机变换为等效的两相电动机，使数学模型降阶。

为了分析方便，假设定子和转子均为集中绕组。图 1-8 表示一对极三相笼型电动机的原理图，图 1-9 为等效的两相电动机原理图。在图中， α_1 、 β_1 代表定子两相绕组， α_2 、 β_2 代表转子两相绕组，与两相绕组匝链的磁通分别用 Φ_α 和 Φ_β 表示，电动势、电流、磁通的假设正方向如图中箭头所示。转子逆时针旋转为假设正方向，其角速度为 ω 。

下面分别推导两相电动机在静止坐标系 α - β 、旋转坐标系 d - q 以及按转子磁场定向的旋转坐标系中的电压方程式。

(一) 两相电动机在静止坐标系中的电压方程

由电机学知，两相异步电动机定子和转子绕组的电压平衡方程式分别为

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha 1} &= i_{\alpha 1} R_1 + p\psi_{\alpha 1} \\ u_{\beta 1} &= i_{\beta 1} R_1 + p\psi_{\beta 1} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_{\alpha 2} R_2 + p\psi_{\alpha 2} + e_{\omega\alpha} \\ 0 &= i_{\beta 2} R_2 + p\psi_{\beta 2} + e_{\omega\beta} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式中 $u_{\alpha 1}$ ——定子 α 绕组电压；

$u_{\beta 1}$ ——定子 β 绕组电压；

$i_{\alpha 1}$ ——定子 α 绕组电流；

$i_{\beta 1}$ ——定子 β 绕组电流；

R_1 ——定子绕组电阻；

$\psi_{\alpha 1}$ ——与定子 α 绕组匝链的磁链；

$\psi_{\beta 1}$ ——与定子 β 绕组匝链的磁链；

$i_{\alpha 2}$ ——转子 α 绕组电流；

$i_{\beta 2}$ ——转子 β 绕组电流；

$\psi_{\alpha 2}$ ——与转子 α 绕组匝链的磁链；

$\psi_{\beta 2}$ ——与转子 β 绕组匝链的磁链；

$e_{\omega\alpha}$ ——转子 α 绕组的速度电动势；

$e_{\omega\beta}$ ——转子 β 绕组的速度电动势；

p ——微分算子。

从图 1-8 可知，当转子以角速度 ω 逆时针旋转时， $\psi_{\beta 2}$ 将在转子 α 绕组中产生与 ω 成比例的感应电动势 $e_{\omega\alpha}$ ， $\psi_{\alpha 2}$ 将在转子 β 绕组中产生感应电动势 $e_{\omega\beta}$ 。显然，按照图中假设的正方向，速度电动势应为

$$\left. \begin{aligned} e_{\omega\alpha} &= \omega\psi_{\beta 2} \\ e_{\omega\beta} &= -\omega\psi_{\alpha 2} \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

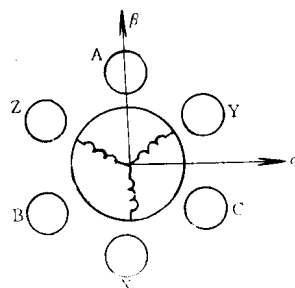


图 1-8 三相电动机示意图

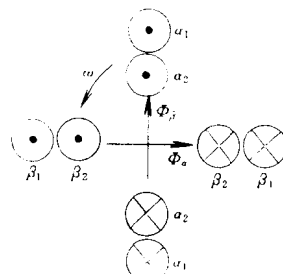


图 1-9 两相电动机示意图

而磁链可以用电流和电感表示, 即

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a1} &= L_1 i_{a1} + L_m i_{a2} \\ \psi_{\beta1} &= L_1 i_{\beta1} + L_m i_{\beta2} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a2} &= L_2 i_{a2} + L_m i_{a1} \\ \psi_{\beta2} &= L_2 i_{\beta2} + L_m i_{\beta1} \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

将式 (1-19)、式 (1-20)、式 (1-21) 代入式 (1-17) 和式 (1-18) 可得到下列方程组

$$\left. \begin{aligned} u_{a1} &= (R_1 + L_1 p) i_{a1} + L_m p i_{a2} \\ u_{\beta1} &= (R_1 + L_1 p) i_{\beta1} + L_m p i_{\beta2} \\ 0 &= L_m p i_{a1} + (R_2 + L_2 p) i_{a2} + \omega L_m i_{\beta1} + \omega L_2 i_{\beta2} \\ 0 &= L_m p i_{\beta1} + (R_2 + L_2 p) i_{\beta2} - \omega L_m i_{a1} - \omega L_2 i_{a2} \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

把式 (1-22) 写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{\beta1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_1 + L_1 p) & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & (R_1 + L_1 p) & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega L_m & (R_2 + L_2 p) & \omega L_2 \\ -\omega L_m & L_m p & -\omega L_2 & (R_2 + L_2 p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{\beta1} \\ i_{a2} \\ i_{\beta2} \end{bmatrix} \quad (1-23)$$

式 (1-22) 和式 (1-23) 即为异步电动机当转子以角速度 ω 旋转时在静止坐标系 α - β 中的电压方程。

(二) 两相电动机在旋转坐标系中的电压方程

建立一个同步旋转坐标系—— d - q 坐标系。由于旋转坐标系以同步角速度 ω_0 逆时针旋转, 所以式 (1-5) 中变换矩阵的角度 λ 是随时间在 $0 \sim 2\pi$ 之间周而复始地变化着。

式 (1-23) 的第一行为

$$u_{a1} = (R_1 + L_1 p) i_{a1} + L_m p i_{a2} \quad (1-24)$$

利用式 (1-5) 把 u_{a1} 、 i_{a1} 、 i_{a2} 变换到旋转坐标系, 即

$$\left. \begin{aligned} u_{a1} &= u_{d1} \cos \lambda - u_{q1} \sin \lambda \\ i_{a1} &= i_{d1} \cos \lambda - i_{q1} \sin \lambda \\ i_{a2} &= i_{d2} \cos \lambda - i_{q2} \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

将式 (1-25) 代入式 (1-24) 可得

$$\begin{aligned} u_{d1} \cos \lambda - u_{q1} \sin \lambda &= R_1 (i_{d1} \cos \lambda - i_{q1} \sin \lambda) \\ &\quad + L_1 p (i_{d1} \cos \lambda - i_{q1} \sin \lambda) \\ &\quad + L_m p (i_{d2} \cos \lambda - i_{q2} \sin \lambda) \end{aligned} \quad (1-26)$$

由于 $p\lambda = p \left[\int \omega_0 dt \right] = \omega_0$, 所以式 (1-26) 右边 三项可以分别写成

第一项: $R_1 i_{d1} \cos \lambda - R_1 i_{q1} \sin \lambda$

第二项: $L_1 [p(i_{d1} \cos \lambda) - p(i_{q1} \sin \lambda)] = L_1 [(p i_{d1} \cos \lambda + i_{d1} p \sin \lambda) - (p i_{q1} \sin \lambda + i_{q1} p \cos \lambda)]$
 $= L_1 [(p i_{d1} \cos \lambda - \omega_0 i_{d1} \sin \lambda) - (p i_{q1} \sin \lambda + \omega_0 i_{q1} \cos \lambda)]$
 $= [L_1 p i_{d1} - \omega_0 L_1 i_{q1}] \cos \lambda - [\omega_0 L_1 i_{d1} + L_1 p i_{q1}] \sin \lambda$

第三项: $L_m [p(i_{d2} \cos \lambda) - p(i_{q2} \sin \lambda)] = [L_m p i_{d2} - \omega_0 L_m i_{q2}] \cos \lambda - [\omega_0 L_m i_{d2} + L_m p i_{q2}] \sin \lambda$

令式 (1-26) 等号两边的 $\cos \lambda$ 和 $\sin \lambda$ 对应项相等, 则可以得到

$$\left. \begin{aligned} u_{d1} &= (R_1 + L_1 p) i_{d1} - L_1 \omega_0 i_{q1} + L_m p i_{d2} - L_m \omega_0 i_{q2} \\ u_{q1} &= (R_1 + L_1 p) i_{q1} + L_1 \omega_0 i_{d1} + L_m \omega_0 i_{d2} + L_m p i_{q2} \end{aligned} \right\} \quad (1-27)$$

转子回路的电压方程可以用同样的方法变换得到。式 (1-23) 的第三行为