



国际电气工程先进技术译丛

ISTE WILEY

特种同步电机控制

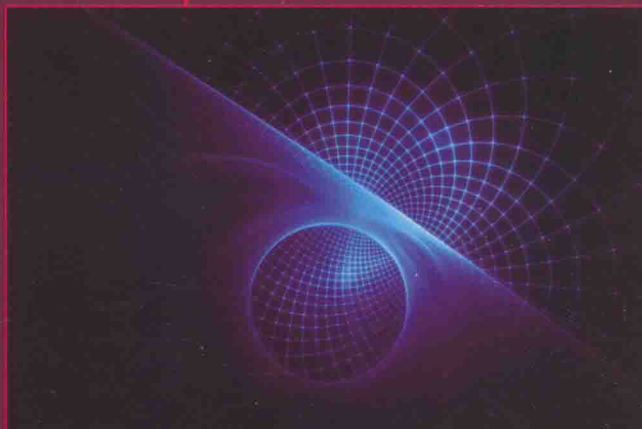
Control of Non-conventional Synchronous Motors

[法] 让·保罗·路易斯 (Jean-Paul Louis) 主编

祝晓辉 李娟娟 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

特种同步电机控制

Control of Non-conventional Synchronous Motors

[法]让·保罗·路易斯 (Jean-Paul·Louis) 主编
祝晓辉 李娟娟 译

机械工业出版社

本书分为两个部分,第一部分由第1~5章构成,讨论的是特种同步电机运行的一般性问题,第二部分由第6~10章构成,渐进式地讨论了多种类型的特种同步电机。

本书主要内容涵盖了特种同步电机控制研究领域的关键技术和最新动向,理论与方法的学术价值较高,理论联系实际的特色比较突出。通过对本书的学习,读者可大致了解欧洲国家近年来在同步电机控制领域所取得的主要研究成果,对于国内从事相关领域研究和应用的学者和工程技术人员以及大中专院校师生具有较高的参考价值。

Copyright © ISTE Ltd 2012.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Control of Non-conventional Synchronous Motors*, ISBN 978-1-84821-331-9, by Jean-Paul Louis. Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由Wiley授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-3988号。

图书在版编目(CIP)数据

特种同步电机控制/(法)让·保罗·路易斯
(Jean-Paul Louis)主编;祝晓辉,李娟娟译. —北京:
机械工业出版社,2016.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Control of Non-conventional
Synchronous Motors

ISBN 978-7-111-54414-2

I. ①特… II. ①让… ②祝… ③李… III. ①同步电
机—控制系统 IV. ①TM341

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第174526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:徐明煜

责任编辑:徐明煜 朱林

责任校对:赵蕊

封面设计:马精明 责任印制:常天培

涿州市星河印刷有限公司印刷

2016年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·20.75印张·396千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-54414-2

定价:99.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

同步电机根据励磁方式的不同可分为电励磁同步电机和永磁同步电机(PMSM)。不论对哪种励磁方式的同步电机,其机械转速和磁场转速(电网频率)都保持严格的同步。目前,同步电机正从传统的发电机应用领域逐步扩展到电动机应用领域。常规类型的同步电动机一般用于旋转驱动的应用场合,例如伺服作动器和电力推进,其控制通常是建立在定子自然参考坐标系($a-b-c$)或转子旋转参考坐标系($d-q$)内,来实现所谓的“自同步控制”和经典转矩控制,这些控制策略即为所熟知的“矢量控制”或“直接转矩控制”,从而实现同步电机的转速调节或位置角调节,或者两者兼而有之。常规同步电机的控制策略通常指的是电机在正常运行时的控制算法及其实现。为了保证同步电机作动器在一些关键场合能够持续安全可靠的运行,或者是实现特殊功率和类型的直线作动,当前在工业和军事领域涌现出诸多特殊类型的同步电机,将其称之为“特种同步电机”,这里的“特种”有两层含义,一层含义是指同步电机的结构(包括绕组和励磁)与普通的同步电机有所相同,另外一层含义是指针对特殊应用场合开发的特定类型的同步电机,例如直线同步电机、变磁阻同步电机、步进同步电机和压电致动作动器等。本书探讨的正是这种特种同步电机的控制问题。

本书是由欧洲研究人员主编的关于特种同步电机控制的研究合集,通过 ISTE 和 Wiley 出版公司在美国和英国出版发行。全书共分 10 章,每章由不同的研究人员撰写。主编为让·保罗·路易斯(Jean-Paul Louis),他的教学和研究领域包括电气系统的建模与控制。各章的主要作者均为欧洲高水平国际会议“电力电子技术与应用大会(EPE)”的会员,在业界具有较高的知名度和学术影响力。本书虽然由不同的研究人员撰写,但根据特种同步电机的运行状况和分类,在各个章节之间的组织上保持了逻辑的严密性和完整性,主要内容涵盖了特种同步电机控制研究领域的关键技术和最新动向,理论与方法的学术价值较高,理论联系实际的特色比较突出。

本书可分为两个部分,第一部分由第 1~5 章构成,讨论的是特种同步电机运行的一般性问题,包括控制系统的建模、故障状态下的降级运行模式、特殊绕组结构和多相同步电机的控制。这些研究内容对于提高同步电机驱动系统运行的安全性和可靠性都具有非常重要的应用价值,是近些年来同步电机控制领域高度关注的研究方向。第二部分由第 6~10 章构成,渐进式地讨论了各种类型的特种同步电机,这些特种电机与常规同步电动机的相近性是相对的,但是它们在某些方面更为相似。第 6 章针对交通运输领域讨论了混合励磁式同步电机的控制,这种类型的同步电机已经广泛应用于电动汽车或混合动力汽车和航空器。第 7 章讨论了直线同步电机的控制策略和方法,本章提出的基于因果序图原理的控制器设计方法可极大地提高直线电机的控制效率,改善系统的整体性能。第 8~9 章讨论的是变磁阻电机、步进电机和压电致动作动器这 3 种特殊类型同步电机的控制方法,涵盖了特种同步电机控制的一般方法和先进方法(例如混沌控制方法),读者从这些章节可全面了解特殊类型同步电机控制器设计的特点和方法。

译者从求学到执教的近 15 年中一直致力于永磁同步电机及其驱动控制系统的研究和教学工作,因此希冀通过自己的浅薄之力将国际上新近出版的有关同步电机控制的优秀著作翻译并介绍给国内的广大研究人员、研究生和工程技术人员。在此也非常感谢机械工业出版社电工电子分社的编辑及其领导,他们对学术译著出版工作的热情和投入使我深受感动。由于译者的学术阅历较短,译文中难免存在科学术语表述不准和错讹之处,敬请广大读者批评指正。

译者

原书前言

对于那些数不胜数的机械工具、机械臂以及一类“特殊机器”的操纵运行而言，现代化工业生产亟须大量的被称为“作动器”的驱动电机。要使上述这些机器运转，必须施加转矩、转速或位移才能使目标物体产生运动（通常是旋转运动），而所有这些都是由高级别的决定性的执行元件所决定的。同时，为了实现高效率的生产力，对执行元件的运行速度和精确性都提出了严格的要求。电机由此便在现代化工业生产中的“轴线控制”领域占据了绝对性的地位。虽然本书主要考虑的是电机在专业领域的应用，但在一些“消费品”领域也可以发现电机的身影。电机同时也在几类交通运输工具的机动化改造中被广泛使用，如陆基运载工具和海基船舶等。本书主要介绍了特种同步作动器和特种同步电机的控制问题。

本书是 ISTE-Wiley 和 Hermes-Lavoisier 出版公司出版的系列图书当中的一部。这一系列图书中的第一本已经在英国出版发行，该书致力于讨论同步电机控制（见参考文献[LOU11]），研究的对象是“常规”类型的同步电机。另一本图书则在此基础上重点讨论了电机的参数辨识和状态观测（见参考文献[FOR10]）。参考文献[HUS09]讨论了电机控制的一般性方法，而另外一部专著（见参考文献[LOR03]）重点关注的是技术性问题。电机的控制伴随着静止变换器（此处指的是逆变器）的控制，这是参考文献[MON 11]的讨论领域，研究的是调制策略和电流控制问题。此外，参考文献[JUF10]和[TRI11]分别讨论了电机的驱动器和故障诊断这两方面的问题。

前面已经出版的一部专著为《同步电机控制》（见参考文献[LOU11]）[⊖]，专门针对“同步电机”类型的机电作动器介绍了其主要优点。同步电机本质上的优势在于其高转矩重量比、可操作性和易用性等，尽管这些优点都是相对而言的，但却是同步电机得以广泛采用的实实在在的现实因素。因此，当同步电机在不同的场合使用时就被称为不同的电机，如“自同步控制同步电机”以及工业中常见的“无刷直流电机”。《同步电机控制》特别针对同步电机讨论了同步作动器的建模和控制问题，这种类型的作动器或多或少地属于常规同步电机的范畴。

为了实现同步电机的控制，参考文献[LOU11]给出了同步电机的经典数学模型，经典数学模型建立在基波的假设条件之上，即磁动势(MMF)为正弦波磁动势（由此可以得到经常使用的“派克模型”），或者是不满足基波磁动势(MMF)的假设

⊖ 此书的中译本由机械工业出版社出版发行。——译者注

条件(当MMF为非正弦波时,可以对派克模型进行“扩展”)。基于这些数学模型,该书第一部分给出了自然参考坐标系(α - b - c)和转子参考坐标系(d - q)下的诸如“自同步控制”和经典转矩控制的基本概念。这些控制通常指的是“矢量控制”且一般应用于“轴线控制”领域,即针对一类工具或转轮的“机械负载”实现转速调节或位置角调节,或者两者兼而有之。据此考虑了应用数字化元器件的控制策略的数字化实现问题。可以认为上述这些控制方法都属于“经典”控制的范畴。该书进而给出了仍然针对常规同步电机的“先进控制”方法,包括直接转矩控制和预测控制。最后需要指出的是,自同步控制作为最经典的控制方法,通常需要机械式位置角传感器。出于多种原因的考虑,通常不希望安装机械式传感器,因此一并介绍了确定性和统计性的“无传感器”控制方法。

本书作为这一系列图书中的第二部,分两部分介绍了同步电机或者类似电机的控制问题。第一部分解决的是同步电机的非常规应用问题(这些同步电机包括晶闸管桥驱动同步电机、运行在降级模式的同步电机以及多相同步电机)。第二部分解决的是电机控制领域专家通常称为特种电机的作动器控制问题(这种类型的电机包括混合式电机、直线电机、可变磁阻电机、步进电机和压电式电机)。特种同步电机和常规同步电机作动器的重要性是一致的,这是因为特种同步电机在结构上与普通的同步电机关联紧密,无论有励磁还是无励磁都是这样。因此,书名当中的形容词“特种”包含两层含义。

对第一层含义的阐述包含5个章节。前两章互为呼应地介绍了由晶闸管桥驱动的“自控式同步电机”。这种控制类型的电机从历史上来说是最先出现的,因为晶闸管是最早诞生的继真空管时代以后可受控制的现代功率电子器件,并随后获得工业应用。随着门极关断(GTO)晶闸管和其他不同类型大功率晶体管[如绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等]的出现和发展,晶闸管桥和同步电机组合在一起逐渐被限制在大功率或超高功率应用场合。此外,在一些老旧设备中还在使用这种控制类型的电机,需要进行相关的维护工作。这种装置有其自身的独特性并经久耐用。两个晶闸管桥允许工作在4个象限内,因此能够实现自然换向的自同步控制,但其复杂性也是显而易见的,因为晶闸管桥可近似地认为是脉冲电流源,当其用作线性换向的逆变器时,从概念上来看就要比整流桥更为复杂精细。此外,对同步电机需要考虑阻尼绕组和线圈励磁问题,其由线性换向的逆变器供电。因此,这一应用领域具有源远流长的研究历史,这也是第1章和第2章重点讨论的内容。

第1章由Francis Labrique和François Baudart撰写,题目是“自控式同步电机:基本原理和简化的控制模型”。本章将同步电机纳入被电气工程师广泛采用的近似框架当中,由此可以对“瞬态电感”进行定义,并且可以给出简单的电气框图,从而对同步电机和晶闸管桥进行建模。然而,此时产生的电流是伪脉冲(换向重叠的重要性),因此需要同时考虑电流谐波。这就需要对由此导致的至关重要的非线性

性模型进行分析,即便设备工作在稳态模式下也是如此。第1章分析了电机作为电动机和发电机的两种不同的运行模式,包括额定运行状态和小于额定值的运行状态。

对于瞬态分析,可以采用的有效方法是将自同步控制晶闸管桥驱动同步电机和由三组换向器组成的直流(DC)电机进行等效。电刷的位置由自同步控制策略和转子位置角确定。由此便可以应用滑动接触电路理论(由 Manuel da Silva Garrido 和 Ernest Matagne 提出,也可以参阅文献[LOU 04a]的第1章)对每个换向周期的信号进行“平均”。据此,可以得到同步电机、晶闸管桥和自同步控制策略组合到一起的全局动态模型。通过这样的全局动态模型就可以确定出阻尼绕组中的交流电流。

第2章由 Ernest Matagne 撰写,标题为“自控式同步电机:包括阻尼绕组和换向重叠特性的动态模型”。本章的研究对象和第1章相同,但是忽略了传统的工程假设条件。首先讨论的是换向重叠问题,换向重叠对于电流的形态和转矩谐波具有重要影响。接下来讨论的是磁通的动态特性问题,包括阻尼绕组当中的磁通变化。最后给出了电气变量的动态模型,这些电气变量由于施加的晶闸管变换器控制而与机电变量紧密耦合在一起。由此就可以得到一个精确的转矩方程。利用转矩方程就能得出框图,这种方法在控制领域被普遍使用,而且还可以确定出瞬态响应特性。这些模型有效、准确并且完全是原创的。应用这些模型可以对大功率自控式同步电机进行综合。

第3章是“同步电机的降级运行模式”,由 Damien Flieller、Ngac Ky Nguyen、Hervé Schwab 和 Guy Sturtzer 撰写,讨论的是同步电机作动器的非常规运行问题。本章研究的内容是当变换器和同步电机组合在一起发生故障时如何实现最优化运行。这也为探讨电力驱动装置的安全重要性问题提供了契机,当发生一定程度的故障时,调节器必须要有继续保持系统运行的能力。针对上述问题已经展开了广泛的研究工作,本章主要对功率晶体管一级最有可能经常发生的故障模式进行了回顾总结(包括最常见的短路故障以及不太常见的开路故障)。绕组发生故障的概率相对比较低。这些故障通常会导致明显的转矩,这些脉动转矩增加了齿槽转矩的幅度。

《同步电机控制》一书(见参考文献[LOU 11])第2章和第3章的核心内容是如何给同步电机提供“健康的”驱动控制,作者给出了关于以下一些问题的通用解决方法,这些问题包括:如何给电机的正常绕组提供最优化的供电驱动,从而可以补偿由事故导致的故障现象。而本书第3章的作者探讨了 n 相电机的通用最优化方法,该电机的特点是具有光滑磁极、反电动势呈正弦波或非正弦波以及至少有一相绕组发生故障。在这个故障相绕组中,电流可能为0(开路状态)或者是达到一个饱和值,也有可能发生电流短路。一般的最优化方法能够计算出注入到正常相

绕组的电流,从而使焦耳损失达到最小化的同时产生期望的转矩,并且对电机的零序电流分量进行限制(达到自由控制或0)。尽管可能出现的情形多种多样,作者指出存在一个全局公式对于扰反电势进行标记,且存在一个标量比例系数 $k_{\text{opt}}(p\theta)$,该系数是转子位置角的周期函数。当知道故障条件时,可以从理论上计算出 $k_{\text{opt}}(p\theta)$ 的系数值。但实际应用中往往比较困难。另外一种较好的解决方案是通过学习装置引入 $k_{\text{opt}}(p\theta)$ 的参数辨识,这可以通过自适应线性神经网络(Adaline网络)来实现。这种自适应控制策略可以使电流达到最优值,从而能在几个周期之后达到对故障的适应状态。

接下来的各章是对特种同步电机进行扩展。电机的经典最优化方法使交流电机的设计和应用达到了巅峰状态。事实上,三相电机使功率重量比达到了最优,这就使电机中由铜导体构成的导体的数量达到了最少(铜导体通常比较昂贵),也使得磁路的重量达到最轻(磁路由铁磁材料构成)。三相电路的优势还在于使电机驱动变换器的功率电子器件数量达到最少。

近段时期以来又诞生了新的最优化准则,特别是在空中运输和海洋运输这样的敏感应用领域,推进系统发生故障会产生灾难性的后果。通过电力的分级分段供应对于提高系统运行的安全性和可靠性日益显得必要。采用具有适当数量桥臂的变换器驱动的多相电机是一种技术解决方案。如果某一相(电机层面或变换器层面)发生故障(由于设备老化导致或内因性、外因性事故导致),那些仍然保持正常工作状态的相允许系统继续正常运行。本书第4章和第5章给出了多相同步电机几种不同类型的技术解决方案。

第4章为“PWM逆变器驱动的双星形联结同步电机控制”,由Mohamed Fouad Benkhoris撰写。如果三相绕组的某一线圈发生故障,由于其他线圈的存在而使系统能够继续运行,从而确保系统工作的连续性。从一个例子可以看到这种类型电机的优势,例如船舶的推进系统。两组线圈可以“混叠放置”或“移位放置”。不同的解决方案使得特种同步电机与“常规多相同步电机”区分开来,后者的绕组规则分布。由于电机受PWM(Pulse Width Modulation)调制型逆变器的驱动,这种运行模态能够产生正弦波电流并限制转矩脉动。常规的三相电机具备这样的良好特性,但对特种电机来说实现起来却较为困难,因为特种电机的三相绕组之间存在磁耦合。

作者阐述了用于控制器设计的双星形联结同步电机的两种建模方法。第一种方法假设电机是由两台经典的三相电机构成(每台三相电机通过经典的派克理论分别进行建模和控制——参见本系列图书中第一部《同步电机控制》前面几个章节),并且考虑到这两台电机存在高度的耦合。第二种方法由原始六相电机建模引入相应的耦合并通过扩展派克变换定义一个等效电机,再由这个模型的“可逆模型”推导控制律。作者详细阐述了以一种用户友好的方式对这类特殊电机进行表

征的数学模型,其核心思想是对双星形联结电机的电感矩阵进行对角化,从而能够得到一个“优异”的参考坐标系和“方便易用”的状态变量。由这种数学模型推导得出的控制律在常规电机中被广泛采用,这种控制律可归纳为所谓的“矢量控制”,即具有电流“调节”项和“解耦”项的矢量控制。Fouad Benkhoris 认为有几种可能的不同解决方法,其详细阐述并验证了其中的一种方法:局部对角化方法和全局对角化方法。

第5章由 Xavier Kestelyn 和 Eric Semail 撰写,标题为“逆变器驱动的非凸极多相电机的向量建模和控制”。本章所研究的同步电机具有规则移相分布的多相绕组,这与普通的三相电机类似,并且给出了两种改进形式的电机,一种电机是各相绕组彼此独立,而另外一种电机的绕组呈单星形联结。电机的励磁由表面安装式永磁体提供。书中的参考实例采用了五相绕组,但对于该电机的建模,作者则采用了很容易地推广到 n 相绕组电机的向量方程。研究表明,由此可以确定一个具有对角化电感矩阵的参考坐标系,这样就能够实现高性能控制。

借助于这种方法,通过对“虚拟电机”进行定义,作者归纳出了普通三相电机广为熟知的基本特性,这个虚拟的电机与两相电机(参与能量转换作用)或“零序”型的单相电机等效。与此同时,理论分析也提供了有用信息,研究表明具有奇数相绕组的星形耦合电机表现优异,并且指出带有偶数相绕组的多星形耦合电机具备实用性。理论分析同时也回答了随之带来的高次谐波问题,这类电机的控制需要获取漏感的必要信息。上述分析结果在电机的设计、驱动以及推导转矩最优时的控制律等方面都非常重要。作者给出了基于不同参考坐标系的多相电机最优电流控制策略,其目的是针对不同虚拟电机的转矩分布问题给出一个指定的转矩。所有的方法都进行了实验验证。

本书的第二部分共包含5章内容,渐进式地讨论了各种类型的特种电机,这些特种电机与同步电机的相近性是相对的,但是它们在某些方面更为相似。

第6章是由 Nicolas Patin 和 Lionel Vido 撰写,标题是“混合励磁同步电机”,本章关注的内容是同步电机的最新进展情况。即使混合励磁同步电机相比单一永磁体励磁的常规同步电机改变较小,但其重要性是非常明显的,因为这种类型的电机通过励磁实现了作动器性能的扩展。在交通运输领域(路基运载工具和空基运载工具)尤其希望使用这种混合励磁类型的电机。同步电机的超速运行和弱磁扩速是一个经常需要考虑到问题,本章针对一般情形的混合励磁同步电机以一种特例的形式讨论了超速运行和弱磁扩速,混合励磁同步电机有两种类型,一种是永磁体固定励磁,另一种是绕组线圈的可调节励磁。

本章区分研究两类不同的电机,即“串联”电机和“并联”电机,分类的标准是绕组产生的磁力线是否通过永磁体。串联形式的电机在弱磁扩速方面具有相当优异的性能,但是对退磁更为敏感。并联形式的电机具有自身的优点,并联电机包括短

路类型电机和非短路类型电机两种。短路类型的电机当逆变器的桥臂发生故障时可改善运行的安全性,但却损失了一部分磁通。非短路类型的电机对前面的不足之处进行了改善。励磁线圈可以放置在定子或转子上,其结构可以是“磁通集中”型或“磁通切换”型。无论采用哪种结构,用于控制器设计的模型都是同步电机常规数学模型的简单扩展,常规同步电机定子绕组匝链的磁通是两种磁通的相加和,一种由永磁体产生,另外一种由绕组产生。派克变换表示方法具有简单高效的特点,即使是相对《同步电机控制》一书第1章给出的常规电机模型方程要复杂一些(自然情况确实如此)。作者以框图的形式推导出了仿真功能框图。一旦得到了模型方程,通过对模型方程求逆就可以得到相应的控制律。由于未知变量(三相电流)相对方程数(一个转矩方程)较多,通过最优化方法得到最优解(使损耗达到最小)。作者给出了带有不同调节环路和“最优器”的控制结构框图。这种方法同样适用于经典单一励磁电机的弱磁控制这一简单情形。

第7章由 Ghislain Remy 和 Pierre-Jean Barre 撰写,标题为“直线同步电机的先进控制策略”。直线型电机最初仅限于感应电机,由于永磁体和相关的电子产品(包括电源和控制)的出现,直线结构电机已经在同步电机领域获得了飞速发展。由此可以得到适用于特定领域的直驱型电机(不使用减速器或传动系统——这些设备价格较贵且容易产生故障)。这些特殊应用领域包括驱动超高速机床(具有非常高的加速度和速度),对这样的应用往往需要具备极高的坚固性和精确性。作者首先描述了这类“永磁同步直线电机(Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, PMSLM)”的组成结构,PMSLM 是这类电机的缩写。然后给出了该电机的数学模型。第一种模型是基波意义上的模型,这与常规的旋转电机相同,然后基于因果序图(Causal Ordering Graph, COG)推导了动态模型。高级数学模型可以针对具体的直线电机运行现象给出相应的描述,这些运行现象包括5次谐波和7次谐波、电流快速瞬态过渡过程中的电感非线性以及由末端应力产生的齿槽转矩等,所有这些现象均会带来转矩的脉动,即产生齿槽转矩。

作者介绍了同步直线电机的常规控制方法,包括标量控制($V/f = \text{常数}$)和具有反演变量的矢量控制。此外,作者提出了基于“反演模型”(由 COG 得到)的控制法,这种控制方法在控制器结构中引入了级联环路。电流控制环由基波模型推导得出并且其调节能力根据逆变器进行确定。为了对齿槽转矩进行补偿,作者提出了多谐振控制或前馈控制这样的高级控制方法。最后,提出了 n 阶微分控制器(或者是无传感器控制意义下的开环预测控制),这种控制方法需要进行理论分析和获得非常精确的数学模型。作者表明,参考数值的产生是考虑电机非线性现象时电机控制所面临的主要问题。

第8章由 Mickael Hilairat、Thierry Lubin 和 Abdelmounaïm Tounzi 撰写,标题为“变磁阻电机:建模和控制”。这里,对常规同步电机进行了更为深入的扩展,

因为此时只有磁阻效应产生作用,磁阻效应存在于“凸极”同步电机当中。接下来转向带有构造性变量的一类“特种同步电机”,构造性变量的数目相比常规同步电机变量要多得多。这就是本章为什么集中讨论两类变磁阻电机的原因所在,变磁阻电机是最具发展前景和工业领域使用最为广泛的电机,变磁阻电机的绕组分散分布于定子上,而开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)的绕组则集中分布在定子上。对变磁阻电机而言,转子侧没有励磁,这就使得这类的电机鲁棒性非常强,特别是在高速运行时(此时电机转子通常较重)。这正是所要寻找的优异特性,因为这些电机被质疑存在缺点(包括转矩波动和 SRM 的噪声),同时需要对电机的结构和驱动器进行最优化设计。

本章首先阐述了磁阻同步电机的主要结构,在结构设计方面要求使凸极效应达到最大化。作者给出了用于控制器设计的自己的建模方法,这些模型大多数是解析模型。转矩与定子绕组电流 i_d 和 i_q 的乘积成正比,这样就仅定义了唯一的一个方程,因此需要对判断准则进行最优化。据此,如果动态响应特性达到最优,可以工作在电流 i_d 等于常值的状态。如果对给定的电流实现转矩最大化,则需要满足 $i_d = i_q$ 。作者同时提出了功率因数的最大化。可以发现,“矢量控制”可以对 d 轴和 q 轴之间的波动项进行补偿。SRM 相比同步电机具有更为广泛的应用领域,其性能表现更为优异。SRM 更适合运行在发生饱和的情形下。最优化(包括设计和驱动)和建模必须在非线性框架内进行,即便是在第一次综合时仅存在一个线性模型也是如此。非线性建模需要使用磁共能的概念,这需要使用预先计算得到的表格。SRM 只工作在具有特定自同步规则的自同步控制模式下。给出了“瞬时控制”和“平均值控制”这类的控制策略,对其性能(包括控制器的复杂性)进行了分析和对比。

第 9 章 Bruno Robert 和 Moez Feki 撰写,关注的是步进电机的控制方法。步进式作动器在工业领域备受推崇,因为步进电机可使用廉价高效的电压驱动器并使其工作在开环状态下。由于此类控制器无法获得高性能的控制效果,因此某些情况下必须进行更为深入的研究,从而合理地设置使用限制条件(以给定的代价),在希望引进闭环控制系统的情形下也是如此。作者以定义通用的步进电机模型开篇,该模型实际上是凸极两相同步电机的变形,且转矩由 3 个参数进行描述。最常见的 3 种步进电机是:

- 永磁式步进电机(主要转矩是电磁转矩);
- 可变磁阻步进电机(主要转矩是磁阻转矩);
- 混合式步进电机,考虑齿槽转矩。

不使用位置传感器(出于经济因素方面的原因)较为普遍,这就意味着控制模型保持在“自然参考坐标系”内(此处指 α - β 参考坐标系,参见《同步电机控制》一书的第 1 章,且此时控制模型是高度非线性的。作者指出必须针对每种不同类型的

电机进行一定的近似。

一般情形下,作者研究了哪种类型的控制策略可以被使用,这些控制策略包括电压驱动(最为经济实用)或电流驱动(相对比较昂贵)的开环控制和闭环控制。对第一种情形(电压驱动),给出了允许不同运行状态类型的工作模式,这些工作模式包括四分之一象限转换模式和混合模式。第二种情形(电流驱动,电机专门针对电流驱动设计)允许进行微调。作者详细介绍了电机的慢速运动、起动方法、共振响应、微调以及最优控制(“Bang-Bang”控制)。对步进电机快速运动的研究需要定义不同的运行区域,包括起停区和驱动区。作者指明如何以低成本处理器获得不同的转速和加速曲线。接下来讨论了闭环控制问题(参见《同步电机控制》一书的最后两章),闭环控制需要获取转子的位置角,位置角信息可由编码器或估计算法得到。实现闭环控制成本较高,因此其经济性优势必须进行验证。作者还介绍了角度控制方法,这种方法具有性能优异、价格昂贵的特点。同时也可以推导出频率控制方法,这种控制方法更为经济,因为它可以工作在开环状态下。频率控制也可以利用速度控制来完成,这就需要对转速进行测量或估计。同时,作者给出了控制器综合方法。在开环状态下,步进电机具有非常明显的非线性运行行为,这就限制了步进电机在高速领域的应用,因为此时电机出现了不稳定和“混沌”现象。据此提出了一种先进的控制方法,即“混沌控制”,应用这种控制方法扩展了电机的高速运行区域。

第10章介绍的作动器起源于经典的同步电机。这种作动器不是电磁式的,而是静电式的,其控制需要采用模拟的概念,例如自同步控制和矢量控制。本章的标题为“压电致动作动器控制”,由 Frédéric Giraud 和 Betty Lemaire-Semail 共同撰写,主要介绍了行波压电电机。这种电机可以取代小尺寸的电磁式电机,其重量转矩比可达10。这里所考虑的电机为两相电机且带有位置传感器。电机的转子和定子相互接触,这样就导致了机械摩擦现象的出现,从而使得建模变得复杂化。因为需要考虑机电(间接压电效应)和机械(由接触产生)两种类型的能量转换,所以建立动态模型比较复杂。作者给出了基于等效电气原理图的数学模型和用机电方程式建立的混合模型。前者只能工作在稳态,后者虽然比较复杂但更为精确。此外还推导了适用于实时控制的数学模型。在定子电压方程的参考系中,“直接模型”产生了4种类型的作用域:

- 电气域;
- 定子域;
- “理想转子”域;
- “真实转子”域。

能量转换适用于定子域和理想转子域的边界,如果将方程建立在 $\alpha\text{-}\beta$ 坐标系内,此时可以观察到其与同步电机模型的相似性(参见《同步电机控制》一书的第1

章)。这种相似性有助于作者在行波参考坐标系内推导出类似 $d-q$ 坐标系的模型方程。

该模型在形式上比较简单,比较适合于不得不采用自同步控制方法的领域(例如交流电机控制)。该模型对于定义转矩估计器也是非常有用的。作者由此给出了压电致动作动器的一大类控制方法。第一种也是最经常使用的一种控制方法基于行为模型(黑箱模型)建立,控制变量可以选择为频率、两相电压的幅值以及两相电压之间的相位移。这些变量和速度之间的关系是非线性的,且存在死区,由此需要进行特殊处理。这就需要使用基于知识模型的方法,虽然这种方法使用频率比较低。作者详细阐述了第二大类模型,这种模型依赖直接模型的“可逆模型”。该方法表明了其在切向轴线控制和正常轴线控制的优势。作者通过选取变量的不同研究了3种不同类型的策略,分别是理想转子的正常转速、电源电压的脉动和开环路径的电压。作者指出如何借助锁相环实现自同步控制。这些控制方法能够避免停转现象并且可对温度漂移进行补偿。

参考文献:由 ISTE-John Wiley 和 EGEM-Hermès 出版的有关电机控制的系列专著。

- [FOR 10] DE FORNEL B., LOUIS J.-P., *Electrical Actuators: Identification and Observation*, ISTE Ltd., London and John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [HUS 09] HUSSON R., *Control Methods for Electrical Machines*, ISTE Ltd., London and John Wiley & Sons, New York, 2009.
- [JUF 10] JUFER M., *Les Entraînements Électriques: Méthodologie de Conception*, Hermès-Lavoisier, Paris, France, 2010.
- [LOR 03] LORON L., *Commande des Systèmes Électriques: Perspectives Technologiques (Traité EGEM, Série Génie Électrique)*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2003.
- [LOU 04a] LOUIS J.-P., *Modélisation des Machines Électriques en vue de Leur Commande, Concepts Généraux (Traité EGEM, Série Génie Électrique)*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2004.
- [LOU 04b] LOUIS J.-P., *Modèles pour la Commande des Actionneurs Électriques (Traité EGEM, Série Génie Électrique)*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2004.
- [LOU 11] LOUIS J.-P., *Control of Synchronous Motors*, ISTE Ltd., London and John Wiley & Sons, New York, 2011.
- [MON 11] MONMASSON E., *Power Electronic Converters: PWM Strategies and Current Control Techniques*, ISTE Ltd., London and John Wiley & Sons, New York, 2011.
- [REZ 11] REZZOUG A., ZAÏM, M.E.H., *Non-conventional Electrical Machines*, ISTE Ltd., London and John Wiley and Sons, New York, 2011.
- [TRI 11] TRIGEASSOU J.-C., *Electrical Machines Diagnosis*, ISTE Ltd., London and John Wiley & Sons, New York, 2011.

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 自控式同步电机:基本原理和简化的控制模型 1

1.1 简介	1
1.2 自控式同步电机设计时需要考虑的特殊方面	2
1.3 用于稳态运行研究的简化数学模型	2
1.4 稳态运行研究	5
1.5 额定转速、电压和电流运行	9
1.6 转矩小于额定转矩时的运行	11
1.7 转速小于额定值时的运行	11
1.8 发电运行	12
1.9 具有电刷和换向器电机的等效形式	12
1.10 根据电路理论推导出的具有滑动接触组件的电机方程	16
1.11 阻尼绕组稳态运行交流电流的评估	19
1.12 电机反转时的换位研究	20
1.13 安装基座的变化	21
1.14 结论	22
1.15 主要符号表	22
1.16 参考文献	22

第 2 章 自控式同步电机:包括阻尼绕组和换向重叠特性的动态模型 24

2.1 简介	24
2.2 N^* 表达式的选择	26
2.3 磁链表达式	29
2.4 $\langle X \rangle$ 、 $\langle Y \rangle$ 和 $\langle Z \rangle$ 系数的一般特性	33
2.5 电气动态方程	34
2.6 机电变量的表达式	37
2.7 转矩表达式	38
2.8 以磁共能表达的方程式	39
2.9 在控制系统中的应用	40
2.10 结论	43

2.11	附录 A: $\langle X \rangle$ 、 $\langle Y \rangle$ 和 $\langle Z \rangle$ 的系数值	44
2.12	附录 B: 系数 $\langle X \rangle$ 、 $\langle Y \rangle$ 和 $\langle Z \rangle$ 的微分值	44
2.13	附录 C: 参数 μ 比较小时的简化方程	45
2.14	附录 D: 第 1 章和第 2 章使用的主要符号列表	46
2.15	参考文献	48
第 3 章	同步电机的降级运行模式	49
3.1	简介	49
3.2	产生故障的主要原因分析	49
3.3	永磁同步电机驱动器的可靠性	54
3.4	结论	56
3.5	永磁同步电机发生故障时的最优驱动策略	57
3.6	非正弦波反电动势同步电机发生故障时的驱动策略	57
3.7	全部情形下获得最优电流的闭环实验性学习策略	81
3.8	仿真结果	83
3.9	一般性结论	85
3.10	术语和符号	86
3.11	参考文献	87
第 4 章	PWM 逆变器驱动的双星形联结同步电机控制	91
4.1	简介	91
4.2	电力作动器的基本特征	92
4.3	基本方程式	93
4.4	双星形联结同步电机的动态模型方程	96
4.5	双星形联结同步电机的控制	107
4.6	参考文献	116
第 5 章	逆变器驱动的非凸极多相电机的向量建模和控制	119
5.1	电机的介绍和描述	119
5.2	逆变器驱动的永磁同步电机的控制模型	120
5.3	多相电机的转矩控制	140
5.4	降级驱动模式下多相电机的建模和转矩控制	151
5.5	参考文献	152
第 6 章	混合励磁同步电机	155
6.1	简介	155
6.2	以控制为目标的建模	166
6.3	模型反演控制	173
6.4	同步电机的超速和弱磁	178

6.5	结论	179
6.6	参考文献	181
第7章	直线同步电机的先进控制策略	182
7.1	简介	182
7.2	直线电机的传统控制方法	191
7.3	直线电机的先进控制方法	200
7.4	结论	211
7.5	术语表	212
7.6	致谢	213
7.7	参考文献	213
7.8	附录:ETEL的LMD10-050数据表	217
第8章	变磁阻电机:建模和控制	218
8.1	简介	218
8.2	同步磁阻电机	219
8.3	开关磁阻电机	230
8.4	结论	246
8.5	参考文献	247
第9章	步进电机的控制	251
9.1	简介	251
9.2	建模	251
9.3	开环控制	255
9.4	闭环控制	265
9.5	先进控制:混沌控制	273
9.6	参考文献	280
第10章	压电致动作动器控制	283
10.1	简介	283
10.2	以驱动电压为参考的因果模型	287
10.3	行波参考坐标系内的因果模型	294
10.4	基于行为模型的控制	303
10.5	基于知识模型的控制	304
10.6	结论	309
10.7	参考文献	310
作者列表	312