



国际电气工程先进技术译丛

ISTE WILEY

同步电机控制

Control of Synchronous Motors

[法] 让·保罗·路易斯 (Jean-Paul Louis) 主编

祝晓辉 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

同步电机控制

Control of Synchronous Motors

[法] 让·保罗·路易斯 (Jean - Paul Louis) 主编

祝晓辉 译



机械工业出版社

Copyright © ISTE Ltd 2011.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Control of Synchronous Motors >, ISBN: 978 - 1 - 84821 - 273 - 2, by Jean - Paul Louis, Published by John Wiley & Sons. 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 - 3973 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

同步电机控制/ (法) 让·保罗·路易斯 (Jean - Paul Louis)
主编; 祝晓辉译. —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 Synchronous Motors
ISBN 978 - 7 - 111 - 54345 - 9

I. ①同… II. ①让…②祝… 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 167234 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 阎洪庆

责任校对: 张薇 封面设计: 马精明

责任印制: 常天培

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 21.75 印张 · 414 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 54345 - 9

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

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书共分9章,各章按照从一般到特殊的思路进行组织。第1~4章围绕一般类型同步电机的转矩控制,从不同参考坐标系下的数学模型出发系统阐述了控制器的结构设计问题,重点研究同步电机最优驱动电流的产生和调节以及转速控制器的设计;在此基础上,第5章讨论了同步电机矢量控制在数字化实现方面所带来的问题,分析控制系统硬件层面和软件层面的时间延迟以及如何对时间延迟进行补偿,从而保证数字控制系统的性能。第6~9章针对永磁同步电机分别阐述了直接转矩控制策略、容错预测控制策略和无传感器控制策略。

本书内容详实丰富,既有基本的数学模型建立和控制器结构理论分析,也包括不同类型先进控制策略的工程实现探讨,并给出了大量的仿真结论和实验结论,理论联系实际的特色较为突出,对于国内从事高性能、高可靠性的机电驱动器设计以及高效率电力传动和驱动等领域的工程技术人员和科研院所研究人员具有较高的参考价值,同时也可作为大专院校相关教师、研究生和高年级本科生开展同步电机教学和科研的参考资料。

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。同步电机的这种特性使其既可以作为发电机运行,也可以作为补偿机和电动机运行。当前,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,特别是各种结构类型永磁同步电机的出现,极大地提高了同步电动机的性能(永磁同步电机具有体积小、效率高、功率因数高、起动转矩大和过载能力强的突出优点),使得同步电机在中小功率、高精度、宽调速范围伺服控制系统、高效节能和高性能专业驱动等领域获得极为广泛的关注和研究,目前已经广泛地应用于航空航天、数控机床、机器人、船舶电力推进和电动汽车等领域,取得了十分显著的效益。需要指出的是,与其他类型的直流电机和交流电机一样,同步电机优异性能的实现是以快速而准确的转矩控制为前提的,由转矩控制才能够实现高动态特性的转速伺服控制和位置伺服控制,从而达到高效节能的应用目标。同步电机的先进控制技术大体上涵盖控制策略和算法、电力电子器件及其变换器技术、高性能专用数字信号处理器技术以及传感器技术等这样几个方面,而这其中又以专门针对交流电机的控制策略和控制算法的研究和实现最具挑战性,例如矢量控制策略、直接转矩控制策略以及无传感器控制策略的提出和应用。从世界范围内来看,欧美的一些发达国家和亚洲的日本最先形成了一批关于同步电机的研究和应用中心,这些中心以理论研究为先导,陆续开发出系列化的交流同步电机伺服驱动器,逐步占领全球驱动器和专业应用领域市场,形成了区域化和全球化的竞争优势,例如美国的艾默生电气公司和通用电气公司、德国西门子公司和日本松下电器产业株式会社等。比较而言,我国在同步电机研究领域的起步较晚,虽然我国已跃居成为稀土永磁材料最大的生产、应用和出口国,但在迈向高效节能的永磁同步电机开发和驱动器强国方面还有很大的上升空间。因此,引进并翻译出版不同国家和地区学术研究中心关于同步电机控制的专业书籍,这对于开拓国内研究人员和工程技术人员的视野、在比较中发现并寻找有价值的研究方向,从而提高我国在电子信息产业、风力发电产业、工业节能电机产业、电动汽车产业等领域的装备制造能力是颇有裨益的。

《Control of Synchronous Motors》(同步电机控制)正是这样一本由欧洲研究人员编写的关于同步电机控制的研究合集,该书首先通过 Hermes Science/Lavoisier 出版社在法国出版发行,后又通过 ISTE - Wiley 和 Hermes - Lavoisier 出版社

在英国和美国进行了再版发行,由此可见该书所具有的国际影响力。全书共分9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。书中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,但各个章节之间逻辑联系紧密,层次分明,涵盖了同步电机控制研究领域的主要方面和最新方向,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,是一本难得的学术书籍。读者由本书可领略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。

本书的各章按照从一般到特殊的思路进行组织,第1~4章围绕一般类型同步电机的转矩控制,从不同参考坐标系下的数学模型出发系统阐述了控制器的结构设计问题,重点研究同步电机最优驱动电流的产生和调节以及转速控制器的设计;在此基础上,第5章讨论了同步电机矢量控制在数字化实现方面所产生的问题,分析控制系统硬件层面和软件层面的时间延迟以及如何对时间延迟进行补偿,从而保证数字控制系统的性能。第6~9章针对永磁同步电机分别阐述了直接转矩控制策略、容错预测控制策略和无传感器控制策略。读者可以发现,这几个方面都是最近一二十年以来同步电机最为活跃的研究领域。研究同步电机直接转矩控制的意义在于快速提高控制系统的响应时间,研究容错预测控制策略能够全面提高同步电机电力作动器的冗余性和可靠性,而研究无传感器控制策略则可以提高交流驱动电机的环境适应性和结构健壮性,在不降低系统动态性能的条件下减少驱动系统的开发制造成本。对这些研究领域的持续关注和投入必将引发以永磁同步电机为核心的交流驱动系统的第二轮快速发展风暴,从而更为深刻地改变人类生产和生活的方方面面,在全球能源紧缺和环境恶化的大背景下提高应对危机的能力。

译者从求学到执教的近15年当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的编辑、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^①

现代化工业生产对机械加工工具的应用极为广泛，这些机械加工工具包括机械手和一类“特殊的机器”，而制造机械加工工具需求量最大的是一种称之为“电机”的执行元件。电机以运动的形式（通常表现为转动）使机械工具产生相应的转矩、转速或位置运动，而所有这些功能的实现都由高精度的、具有决定性作用的执行元件所决定。执行元件的快速性和精确性对提高生产效率和质量至关重要。因此，电机在“驱动控制”领域已经占据绝对的优势。也正因为如此，电机广泛应用于现代化生产领域，同时也在大量的一般性场合获得应用。本书仅限于探讨电机的专业应用领域。事实上，由于电机具有可操纵性强以及易于使用的特点（这只是相比较而言，但其效率较高），这使得电机具有突出的优势。举例来说，液压马达从“转矩重量比”的角度来看具有更为优异的性能，但液压马达的控制相对来说更为复杂。

从历史上来看，直流电机是最早获得应用的一种电机类型，这是因为从某些方面来说，直流电机的表现相当完美：无论是从变换器层面来看（一个晶闸管整流器或晶体管斩波器就足矣），还是从控制层面来看，直流电机在调速控制和实现方面均具有卓越的性能。实际上，对直流电机而言，“电磁转矩”与“电枢电流”成正比，因此，用一个简单的“电流环”对转矩进行调节，然后再通过一个“速度环”就可完全实现电子化的“转速调节器”（参见 J. P. Hantier 撰写的参考文献 [LOU 04b] 第 1 章当中的相关内容）。直流电机最大的缺点是其固有的“机械换向器”，通过精准设计安装的机械换向元件来实现控制层面的简化。然而，机械换向器在结构上较为脆弱，并且在潮湿或沙尘环境下容易出现故障。此外，由于电枢电流环绕电机转子运行，这就给散热带来较大的困难。上述因素限制了直流电机容量与性能的进一步提升，因为直流电机的电流和与其相对应的净转矩无法达到较高的数值。

电力电子器件技术的发展以及逆变器应用范围的拓展使交流电机的驱动变得像直流电机一样简单。然而，交流电机控制存在的一个问题是，必须获得转子的位置角信息，这就需要安装机械式位置传感器（或者是通过其他方法与手段获得转子位置角），由转子位置角信息可通过“自同步控制系统”实现所谓的“电子换向”功能。

① 前言内容由 Jean - Paul Louis 撰写。——原书注

本书是交流电机系列图书中的一本, 鉴于同步电机在交流电机当中具有相当重要的地位, 本书重点讨论同步电机的控制问题。长久以来, 使用最为广泛的同步电机是交流同步电机, 例如交流同步发电机。然而, 其主要是运行在电动机模式, 即便是在瞬态过程中也是如此, 由电动机运行模式过渡到发电机运行模式。如果交流电源的频率固定, 那么同步电机就只能以恒定的转速运行。电力电子器件的发展彻底改变了这种形势。晶闸管桥式电路(以“线性换向逆变器”模式运行)的出现催生了早期的自控式同步电机, 其主要应用于大功率场合, 例如轧机组, 或者是用于机车牵引(最早出现的法国高速列车即是如此)。针对“强迫换向”逆变器的电力电子器件的发展(例如, 晶体管、GTO 晶闸管)促进了变频供电交流电机日益获得广泛应用。最后, 微处理器的大量涌现使得交流电机的控制功能变得更为强大, 这得益于专业而复杂的控制算法的研究, 这些控制算法借助微处理器可以高速运行, 从而实现了交流电机的实时控制。

最早用于电动机领域的交流电机是交流同步电动机, 通常由永磁体实现励磁。位置角传感器(或类似的功能实现)用于实现电机的自控同步运行。自控式同步电动机的运行性能可以与直流电动机相媲美, 甚至是达到两者完全相同, 因为其电磁转矩实际上与某一电流成正比(即广为熟知的“ q 轴”电流, 见本书第3章)。与直流电机相比, 交流电机有其自身特有的技术优势。首先, 交流电机的“电枢电流”围绕定子运行, 因此, 交流电机的冷却变得简单易行, 这使得交流电机的电流以及转矩重量比相比直流电机可以高出很多。其次, 交流电机用“电子换向器”取代了“机械换向器”, 这就避免了机械磨损和换向火花, 极大地减少了由此带来的结构性和安全性问题。交流电机的运行鲁棒性变得极为优异。由此不难理解各器件生产商(包括电机制造、逆变器制造以及控制器制造)以富有竞争力的产品范围拓展获得了快速高效的发展。

综上所述, 这些已经获得应用的同步电机可以有多种称谓, 包括“自控式同步电机”, 或者是“电子换向式同步电机”, 其工业命名通常是“无刷直流电机”, 或者是“无换向器直流电机”^①。永磁同步电机的异军突起有其发展必然性, 本书多数章节对此都将予以阐述。高效永磁体制造成本的降低是永磁同步电机得以快速发展的首要原因。

然而, 永磁同步电机的地位已经受到其他类型常规交流电机的挑战, 这主要是指感应电机。感应电机的转子结构简单、强度高, 这自然而然就使得其与同步电机相比具有经济优势。关于异步电机与同步电机孰优孰劣的讨论, 在工业界一直较为盛行。一个不可避免的事实却是, 感应电机在驱动控制应用方面较为困难。

① 这种称谓的同步电机通常是指阶梯波磁场分布的同步电机, 阶梯波同步电机由方波电流进行供电, 本书对此将多次予以讨论。——原书注

为了使感应电机的性能接近于同步电机,在感应电机的驱动和控制等领域已经开展了大量的研究工作,主要体现在“矢量控制”方面。相关书籍将在专著系列的框架下对这种类型的电机进行系统讨论。这里仅仅需要指出的是,在铁磁制造工业者的不懈努力下,永磁体制造成本的降低使得永磁电机相比感应电机更具经济优势,促进了同步电机的广泛应用。

本书是 ISTE - Wiley 出版社和 Hermes - Lavoisier 出版社出版的系列图书中的一本。这个系列中的两本书已经出版发行。这两本书主要阐述用于电机控制的建模问题(见参考文献 [LOU 04a, LOU 04b])。另一本书阐述电机的参数辨识和状态观测问题(见参考文献 [FOR 10])。参考文献 [HUS 09] 当中的一卷给出了电机控制的一般性方法,而参考文献 [LOR 03] 则讨论了相关的技术问题。电机控制与静止变换器(此处指静止逆变器)的控制密切相关,在过去,电机控制研究尤为关注逆变器控制理论与方法(通常也是极为复杂的)。如今,随着技术实现的发展和进步,这两者的研究活动不再显得那么紧密,特别是当逆变器工作在强迫换向工作模式下且其控制采用脉宽调制(PWM)策略:参考文献 [MON 11] 对此重点加以谈论,主要集中在调制方法和电流控制这两个方面。

据此,本书内容的定位目标是“常规”同步电机的控制律。另一本书(即将出版)则集中阐述“非常规”同步电机的控制律问题,非常规同步电机通常是常规同步电机的具体替代。常规同步电机由设定的具体假设条件进行定义,特别是指能够不受限制地使用“派克变换”(或称之为“ $d-q$ 变换”)。这些假设条件将在本书第1章进行全面回顾,本章由 Jean - Paul Louis、Damien Flieller、Ngac Ky Nguyen 和 Guy Sturtzer 共同撰写。这些假设条件可归结为如下几个简短语句的概括:线性(非饱和)、基波(正弦磁场分布)以及对称性(或者是“循环性”)。但通常而言,工业上使用的电机不完全满足上述假设条件(例如,非正弦磁场分布电机或阶梯波磁场分布电机)。此外,可以对上述假设条件做出一些扩展,以此表明对“常规”这一形容词可以赋以“扩展”的含义。本书第1章归纳总结了同步电机的基本数学模型,这些数学模型对同步电机的控制而言是十分必要的,主要包括:

- 1) 自然三相参考坐标系内的数学模型(或称之为“ $a-b-c$ ”参考坐标系)。
- 2) 两相康科迪亚参考坐标系内的数学模型(或称之为“ $\alpha-\beta$ ”参考坐标系)。
- 3) 转子旋转参考坐标系或派克参考坐标系内的数学模型(或称之为“ $d-q$ ”参考坐标系)。
- 4) 对一些非正弦磁场分布同步电机的扩展数学模型。

无论哪种类型的电机,实现电机控制的关键环节是转矩控制。因此,本书用

两章着重对此基本问题进行阐述，这两章（第2章和第3章）由 Damien Flieller、Jean - Paul Louis、Guy Sturtzer 和 Ngac Ky Nguyen 共同撰写。首先需要解决的问题是如何建立用于定义电机“可逆模型”的“直接模型”，电机的“可逆模型”实质上就是电机的控制律。由此可得到称之为“矢量控制”的控制算法，矢量控制的核心是“自同步控制”（即必须将电机的电流与反电动势（back - EMF）进行同步，最终的结果就是与电机的转子位置角保持同步）。“自同步控制”这个名词在感应电机控制领域广为流行，但其在同步电机控制方面却得到了异常好的控制效果。这里，适用于电机控制的控制律与控制科学的一般控制方法完全一致，诸如“基于状态反馈的输入 - 输出线性化”等，电气工程师在实现电机的“ d 轴和 q 轴解耦控制”时很自然地就会应用这些控制理论与方法。

矢量控制表明，为了产生电磁转矩，必须对电机注入电流并对电流进行调节。电流调节主要有两种方案：

1) 在自然“ $a-b-c$ ”参考坐标系内对三相电流进行调节，此时三相电流可有效地测量出来。

2) 在派克旋转“ $d-q$ ”参考坐标系内对电流进行调节，此时必须通过实时计算对三相电流进行重构。

第一种解决方案是首选方案，在技术实现上较为简单，因此也是最先获得应用的方法。该方法的优点是可直接针对实际电流进行调节，电流监控直观迅速，但要想获得优异的调节效果往往比较困难，这是因为在跟踪正弦参考电流时存在静态误差，可以对此采取具体的解决策略（本书将介绍其中的一种方法）。

第二种解决方案从本质上来看更为有效，因为 $d-q$ 参考坐标系内的电流呈“连续”状态，但由于此时需要进行大量的实时计算，只有市场上出现专业高效的运算器件才更为实际可行。

上述两种方法有各自的优点和不足之处。第2章（ $a-b-c$ 参考坐标系内的控制）和第3章（ $d-q$ 参考坐标系内的控制）分别对此进行阐述和讨论。出于简化的目的，各种控制策略基于PWM调制逆变器实现。参考文献[MON 11]给出了电流调节的其他方法（例如，“滞环控制”）。

电机控制专业人士遇到的另一个问题是有关如何确定电机注入电流的最优值。事实上，电机制造商往往寻求获得电机的最佳转矩重量比，这就使电机的磁场通常呈非正弦分布，因此，最优控制电流（也就是使焦耳损耗达到最小时产生所需转矩的精确电流）不再是正弦波电流。第2章针对非凸极电机（具有齿槽转矩）的特殊情形，给出了自然 $a-b-c$ 参考坐标系内的功能强大的分析工具。第3章特别针对凸极电机（同样具有齿槽转矩）分析了派克坐标变换下使控制律更为有效的几何解决方案的可能性。

电机控制具有几种不同的范畴：这里仅仅考虑到当中的一种，即逆变器控

制。电机的其他控制类别包括“位置角控制”和“驱动控制”。对最后一种控制类别，由 Jean - Paul Louis、Damien Flieller、Ngac Ky Nguyen 和 Guy Sturtzer 共同撰写的第 4 章列举了同步电机“电子转速调节器”的若干实例。“转速调节器”是工业领域一个十分常见的控制单元。这一控制单元对用户来说通常必须是“透明”的。该前置控制单元根据上一级控制输出给出参考转速。此时，电机必须要以特别快的动态模型实现转速响应。解决转矩控制问题是第一步，第 2 章和第 3 章对此加以讨论并通过若干解决实例进行说明。转速控制是第二步，转速控制主要根据机械负载进行。

机械负载的形式比较简单，例如具有恒定负载转矩的单一的惯性负载。这种类型的机械负载是多数研究中通常予以考虑的负载类型。但必须引起读者注意的是，实际当中经常会遇到更为复杂的机械负载。这里举两个有代表性的例子：一是转动惯量可变的机械负载（例如，机械臂或折卷机 - 复卷机）；二是具有弹性连接结构以及干摩擦和黏滞摩擦的机械负载，这类负载存在的问题是辨识起来比较困难，或者工作在振荡状态（例如轧机组）。因此，必须以脱离电力电子专家看待具体电机控制的视角来研究机械负载问题，因为电力电子领域的专业人士在设计实现优异的转矩控制时，通常对机械负载的类型和特性不甚了解。复杂情形下的“驱动控制”涉及应用于复杂机械系统的通用自动装置。参考文献 [HUS 09] 研究并解决了这些问题。

然而，一些驱动控制问题与电机的特性紧密联系在一起。第 4 章对此问题展开论述，由 Jean - Paul Louis、Damien Flieller、Ngac Ky Nguyen 和 Guy Sturtzer 共同撰写。作者在本章讨论了用于最常见的机械系统的转轴控制实例，其原因是这种类型的应用被视为机械负载的通用典范：转动惯量恒定、具有黏滞摩擦特性且负载转矩阶梯变化恒定。结果表明，诸如第 2 章和第 3 章给出的转矩控制策略对转速控制性能带来一定影响，并且随之出现的问题是，相同的控制律根据转矩控制选择参考坐标系的不同（ $a-b-c$ 参考坐标系或 $d-q$ 参考坐标系）而无法达到同样的控制性能。

同时也可以看出，将同步电机的一般控制方法应用到上述典型控制对象具有很明显的优势。事实上，通过采用传统的机械式传感器，所有的状态变量都是可测量得到的，由此可实现转速和位置角的高效控制。据此，本书将验证几种调节策略和反馈控制方法（P 控制器、IP 控制器以及负载观测器），这里假设通过采用前面提到的方法可以获得优异的转矩控制效果。本章也对有关鲁棒性的一些问题进行了验证。

第 2 章与第 3 章给出的转矩控制（电流控制）用常规连续方程进行建模，包括代数方程、微分方程以及传递函数等。当使用相近的元件时，由这些模型描述的控制律可立即实现置换。但长久以来，控制律的实现一直采用数字化技术，

包括微处理器、专业的数字信号处理器以及 FPGA 芯片等。参考文献 [LOR 03] 对此进行了专门阐述。数字技术的使用同时也带来了一些新的问题。本书第 5 章讨论了同步电机电流控制和转速控制的数字化和实现问题, 第 5 章由 Flavia Khatounian 和 Eric Monmasson 撰写。本章探讨的内容是前面的章节并未提及的一些问题: 电流和 PI 类型的数字调节器、电流环的快速采样频率、转速和位置调节环的较慢采样速率以及由技术实现带来的对各种限制条件的界定。

事实上, 针对控制律的具体实现需要开展特定方面的研究工作。必须对接口电路和传感器进行建模, 尤其是位置角编码器。然后, 必须逐一研究数字化实现框架下需要考虑到各种物理现象, 包括采样频率的选择、由各种数字计算和 PWM 调制导致的时间延迟、信息测量的量化效应、增量式位置角编码器带来的分辨率问题、由位置角的数值微分计算转速的问题、控制律的离散化、PWM 的过调制问题以及 d 轴、 q 轴参考电压的逆变换实现问题 (对 d 轴、 q 轴参考电压进行逆变换时, 派克变换角与实际值存在差异)。本章对这些问题进行了系统的归纳总结, 而其他专业书籍和学术论文很少对此予以全面分析。尤为重要的是, 本章给出了一个十分完整而具体的“时间框图”, 并且精确地列出了各种需要验证的“关键周期”。

转矩控制 (第 2 章、第 3 章、第 5 章) 和转速控制 (第 4 章) 由于“矢量控制”的实际应用问题而受到一定限制, 这与矢量控制由脉冲宽度调制策略对逆变器进行调制有关。基于脉宽调制逆变器的矢量控制技术已经成为当今最常见的控制方法, 并在工业领域获得了广泛应用。矢量控制的优势所在是可以将静止变换器 (逆变器) 的控制与电机的控制进行解耦。这种解耦形式上比较简单, 在工业领域的应用价值非常显著。当然, 据此无法保证系统的整体输出能达到最优化[⊖]。需要指出的是, 最近几年以来, 又出现了几种不同的控制策略, 例如“预测控制”和“直接转矩控制” (DTC)。这些“智能化”的控制策略寻求电机-逆变器联合层面上的最优化, 以获得新的控制特性。

第 6 章由 Jean-Marie Rétif 撰写, 首先给出了转矩的“直接控制”方法。转矩直接控制法是特别针对异步电机发展起来的一种控制方法。对低频大功率逆变器供电的电机而言, 这种控制方法是非常有效的。本章将这种控制方法用于同步电机的控制。从工作原理上来看, DTC 是一种基于磁通和电磁转矩变化趋势已知的试探性方法。这种试探性方法决定了逆变器的硬件拓扑结构, 使供电电压的

⊖ 这里又遇到了“局部最优化”和“全局最优化”相对应这一经典问题: 电机本身的控制可以达到最优化, 而逆变器控制也可以单独获得最优化 (此即为两个最优化问题)。而局部最优化控制并不能保证电机和逆变器组成的整体可以达到最优控制效果 (全局最优化)。这一问题目前已被电动汽车领域的专家广为熟知, 其寻求的目标是基于嵌入式系统实现整个电路系统的损耗达到可能的最小化。——原书注

波动达到最理想状态,由此,设计控制器时能将逆变器建模和电机建模紧密结合到一起。控制器本身由滞环控制算法实现,因此控制效果快速高效。综上分析,采用直接控制法极有可能获得最快的转矩响应时间。该方法在使用时的限制条件之一是,当控制目标值穿越阈值时,计算单元(通常是微处理器)持续不断地进行运算以达到切换控制的效果,这使其在应用处理器时受到很大的限制。此外,这种控制方法会使切换频率发生变化,这在某些应用场合是无法接受的。

为了克服上述缺点,引入了其他的控制方法,例如固定频率 DTC。基于解析数学模型设计控制算法通常要比基于状态变化趋势的试探性控制算法要好。此外,将现代控制理论应用到电机控制领域的发展趋势是使用“混合方法”,因此,控制器的输出不再是所期望的电压值,而是逆变器的拓扑结构(对应不同的电压矢量)。由此演变出现阶段快速发展的一个控制门类——“预测控制”。第6章给出了“直接预测控制”方法在同步电机的应用。普通的二电平逆变器仅有8个不同的电压矢量,并且很容易计算出来,通过模型的线性化,可以得到给定时刻的最优控制电压矢量。本章作者举例给出了行之有效的控制策略。

由上述预测控制算法并不能得到一个单一而完整的控制理论,但是却导致了一个控制门类的诞生,这个控制门类拥有大量的不同控制算法和应用领域。由于预测控制发展前景非常广阔,第7章随后给出了该控制方法另外一种具体应用。第7章举例说明了预测控制算法在逆变器容错方面的应用,由 Caroline Doc、Vincent Lanfranch 和 Nicolas Patin 共同撰写。该实例表明现代控制理论的发展为一些棘手问题(故障条件下的控制)带来了解决方案,这是普通控制方法难以有效解决的,例如对普通的 $d-q$ 参考坐标系内的矢量控制策略,通常要事先假设电机和变换器的工作正常。因此,新的控制策略为解决现实问题带来了希望。

这也是本书最后两章的目的。普通的同步电机控制需要位置角传感器来实现自同步控制,即使是转矩控制和转速控制也同样需要位置角传感器。然而,在某些情况下希望实现“无传感器”控制,例如无机械位置角传感器控制。之所以采用无传感器控制,是因为这种控制方法能使控制系统的成本降低、体积减小、可靠性提高,或者是当传感器信号消失时(发生故障或意外情况)仍然能保持“降级运行”。这些问题长久以来一直被广为关注且直到目前仍是重要的研究方向。针对上述问题提出了许多解决方案,这也是本书用两章对这个极为重要的问题进行探讨的原因。

Maurice Fadel 在第8章研究了同步电机无机械传感器控制的基本特性。事实上,对无传感器控制而言,位置角不再是一个通过测量得到的状态变量,而是通过实时计算由状态重构算法得到的,状态重构采用的算法主要是基于模型参考控制的扩展卡尔曼滤波器。因此,这个由计算得到的变量具有动态变化特性,这就对电机的各个控制环节产生一定的影响,同时也对状态观测带来影响,特别是负

载转矩观测，因为负载转矩通常是在控制当中通过数值积分计算得到的。本书第4章对这一问题进行了归纳总结，参考文献 [FOR 10] 则在第7章（由 Maurice Fadel 和 Bernard de Fornel 撰写）和第8章（由 Stéphane Caux 和 Maurice Fadel 撰写）对该问题进行了详细的研究和讨论。

第8章对不同的动态方程进行了验证，这些动态方程包括位置角状态观测器、负载转矩观测器、转速控制器等，并通过设置逆变器不同的解耦频率进行了对比分析。研究问题的思路采用非线性方法，所关注的重点是观测器—控制器集合的全局稳定性，这些控制器和观测器构成了电子化的转速和位置角调节器。

第9章由 Farid Meibody - Tabar 和 Babak Nahid - Mobarakeh 撰写，对同步电机确定性位置角状态观测器进行了更为深入细致的研究。这些方法一般采用反电动势（EMF）的估计值，因为对反电动势进行估计具有突出的优点（仅仅需要获取数量极少的电气变量）。反电动势法的缺点是收敛域范围有限，由此会带来重要的稳定性问题。这就是本章采用基本的非线性方法研究问题的原因所在，其目的是保证用估计位置角进行控制时能够实现全局稳定。主要方法由 Matsui 提出。该方法非常有趣，但存在的问题是收敛域比较小。但是，本章的研究表明，可以对控制器的收敛域进行扩展。据此，本章作者研究了对位置角和转速进行无机械传感器控制和观测的一类方法，同时也对基于状态观测器的控制器特性进行了验证，包括稳定性问题和参数变化带来的动态特性和鲁棒性问题。

综上所述，本书针对常规类型的同步电机控制方法给出了系统全面的阐述，这些方法涵盖传统的方法（基于 PWM 调制逆变器的调节）和极具发展前景的更为先进的方法，例如直接转矩控制法和预测控制法。本书通过强调无机械传感器控制这一极为重要的问题，对模型建立和控制方法进行了扩展。

其他一些问题与同步电机基于 PWM 调制电压源型逆变器供电转矩控制、转速控制或位置角控制并无直接关联。但这些问题与供电模态或其他非常规类型电机有关，也就是“特殊类型的电机”，通常指的是同步电机。因此从逻辑上来看，讨论完常规同步电机的控制问题之后势必会考虑到特种同步电机。特种同步电机控制是即将出版的另外一部专著所重点关注的问题。

通过本书的出版对 René Husson (Nancy) 和 Manual da Silva Garrido (Lisbon) 致以深切的怀念，他们对 EGEM 系列图书的发展做出了重要贡献（见第1章参考文献 [HUS 09] 和 [LOU 04a]）。

参考文献

由 ISTE - Wiley 和 Hermes - Lavoisier 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, London and John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [HUS 09] HUSSON R. (ed.), *Control Methods for Electrical Machines*, ISTE, London and John Wiley & Sons, New York, 2009.
- [LOR 03] LORON L. (ed.), *Commande des systèmes électriques : perspectives technologiques*, Hermès, Paris, 2003.
- [LOU 04a] LOUIS J.-P (ed.), *Modélisation des machines électriques en vue de leur commande, concepts généraux*, Hermès, Paris, 2004.
- [LOU 04b] LOUIS J.-P (ed.), *Modèles pour la commande des actionneurs électriques*, Hermès, Paris, 2004.
- [MON 11] MONMASSON E. (ed.), *Power Electronic Converters: PWM Strategies and Current Control Techniques*, ISTE, London and John Wiley & Sons, New York, 2011.

目 录

译者序

原书前言

第1章 同步电机的控制、相关问题与建模	1
1.1 简介	1
1.2 同步电机控制的相关问题	1
1.2.1 基于矢量控制策略的同步电机控制	1
1.2.2 同步电机的直接模型/逆模型及建模假设	3
1.2.3 同步电机控制特性	5
1.3 同步电机的结构描述和物理建模	6
1.3.1 同步电机结构特征	6
1.3.2 建模假设	7
1.3.3 符号说明	8
1.3.4 主要变换矩阵	8
1.3.5 同步电机的物理模型	9
1.3.6 二电平电压逆变器	10
1.3.7 机械负载建模	11
1.4 自然三相 $a-b-c$ 参考坐标系内的同步电机动态模型	12
1.4.1 非凸极电机励磁不变情形下的数学模型	12
1.4.2 $a-b-c$ 参考坐标系内正弦稳态工作情形下的电磁转矩	15
1.4.3 向非正弦磁场分布电机的扩展	16
1.5 $\alpha-\beta$ 和 $d-q$ 参考坐标系内的矢量变换与动态模型（考虑正弦磁场分布电机且区分非凸极和凸极两种情形）	20
1.5.1 因式分解矩阵建模	20
1.5.2 康科迪亚变换： $\alpha-\beta$ 参考坐标系	21
1.5.3 派克变换：用于凸极同步电机	22
1.5.4 对转矩系数的注释	25
1.6 将派克变换扩展应用到非正弦磁场分布同步电机的可行性	25
1.7 结论	31
1.8 附录	32
1.8.1 电机参数值	32
1.8.2 术语和符号	33

1.8.3 致谢	35
1.9 参考文献	35
第2章 $a-b-c$ 参考坐标系内的同步电机最优供电及转矩控制	40
2.1 简介： $a-b-c$ 参考坐标系内的控制问题	40
2.2 $a-b-c$ 参考坐标系内的数学模型：稳态向瞬态的扩展应用	40
2.2.1 正弦波磁场分布电机情形	40
2.2.2 阶梯波磁场分布电机情形（无刷直流电机）	41
2.2.3 关于非正弦波磁场分布电机电磁转矩的注释	43
2.3 $a-b-c$ 参考坐标系内的转矩控制器结构	44
2.3.1 正弦波磁场分布电机情形	44
2.3.2 向无刷直流电机的扩展（阶梯波磁场分布电机情形）	45
2.4 $a-b-c$ 参考坐标系内的控制器性能和缺点	46
2.4.1 比例控制器情形	46
2.4.2 积分比例（IP）电流调节器情形	50
2.4.3 $a-b-c$ 参考坐标系内 IP 控制器的派克分量解释	53
2.4.4 高级控制器：谐振控制器实例	59
2.4.5 基于谐振控制器电流调节的派克变换解释	62
2.5 通用化：驱动器对非正弦磁场分布电机的应用扩展	64
2.5.1 建模方法的通用化	64
2.5.2 方程解的第一种求解方法（试探解）	65
2.5.3 第一泛化：焦耳损耗最优化（对零序电流无约束）	66
2.5.4 方法应用：正弦波反电动势电机的最优化	67
2.5.5 第二泛化：带约束条件的焦耳损耗最优化（零序电流必须等于零）	68
2.5.6 两个最优电流的几何解释	70
2.6 应用傅里叶展开式获得最优电流	73
2.6.1 应用傅里叶展开式的兴趣所在	73
2.6.2 傅里叶系数建模法（复系数）	74
2.6.3 傅里叶展开式的结论特性	75
2.6.4 第一种重要情形：反电动势仅包含奇次谐波	75
2.6.5 第二种重要情形：反电动势仅包含偶次谐波	75
2.6.6 一般情形：奇次谐波和偶次谐波同时存在	76
2.6.7 基本原则：产生转矩的必要条件是注入不同的谐波	76
2.6.8 最优化的一般方法（用一个实例进行探索性解释）	76
2.6.9 最优化方法的一般表述	79
2.6.10 一个重要的实例：正弦波磁场分布电机	85
2.6.11 应用：得到恒定转矩	86
2.6.12 主要结论	87