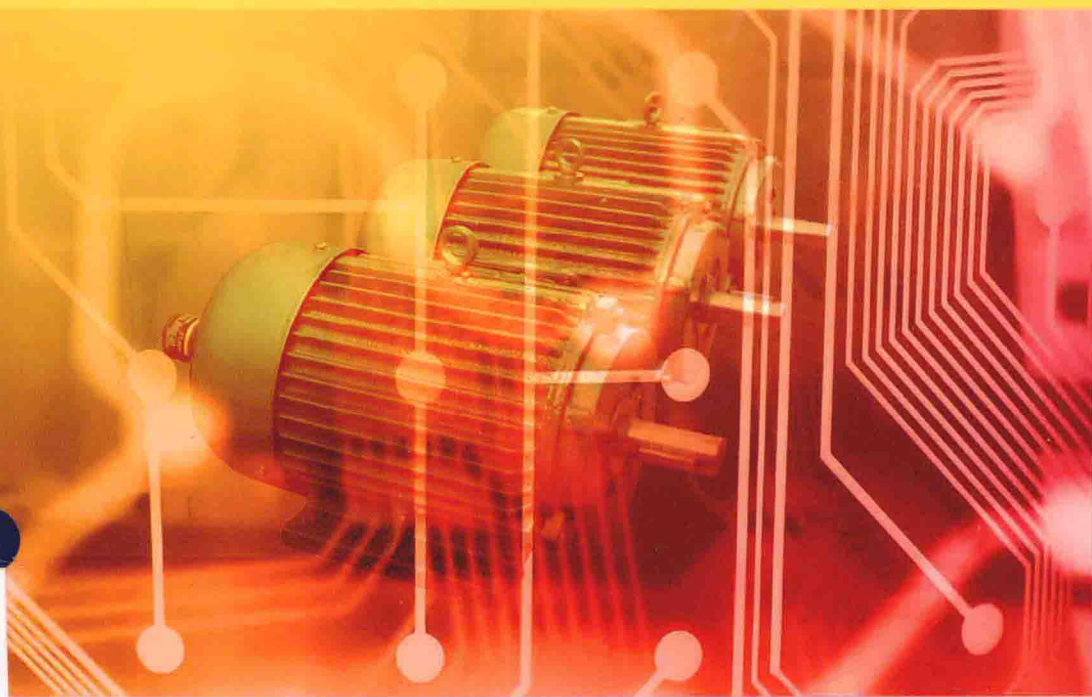


国家自然科学基金资助项目
台达电力电子科教发展计划资助项目

永磁同步电动机 直接转矩控制系统



胡育文 高瑾 杨建飞 郝振洋 © 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家自然科学基金资助项目

台达电力电子科教发展计划资助项目

永磁同步电动机 直接转矩控制系统

胡育文 高 瑾 杨建飞 郝振洋 著



机械工业出版社

永磁同步电动机直接转矩控制(DTC)技术是20世纪90年代发展起来的一项重要电机调速技术。本书详细介绍了作者在三类永磁同步电动机(正弦波永磁同步电动机、无刷直流电动机、永磁容错电动机)直接转矩控制技术方面的研究成果。本书建立了正弦波永磁同步电动机DTC系统的理论构架;澄清了无刷直流电动机、永磁容错电动机DTC系统中的一些模糊概念,初步理顺了三类永磁同步电动机的DTC技术研究思路,为建立DTC理论构架打下了可靠的基础。永磁同步电动机DTC技术广泛应用于永磁同步电动机的调速系统和新能源技术,如电动汽车、电气列车、城市轨道交通列车(地铁、轻轨)等的驱动系统和工业伺服系统、各类调速系统、风力发电系统等重要产品。本书中有作者从大量仿真和实验中获得的数据和波形,可供有关研究人员参考。

本书可供电机调速、伺服系统、电动汽车、轨道交通和风力发电等领域的研究所、企业、高等院校的研究开发人员阅读,也可供高等院校电机控制、电力电子与电力传动及其相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

永磁同步电动机直接转矩控制系统/胡育文等著. —北京:机械工业出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-111-49238-2

I. ①永… II. ①胡… III. ①永磁式电机—同步电动机—直接转矩控制 IV. ①TM351

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第019100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:牛新国 责任编辑:牛新国 阎洪庆

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·19.75印张·394千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-49238-2

定价:60.00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

前 言

20 世纪七八十年代是交流电动机调速系统发展的黄金时代,1971 年发明了矢量控制技术,1985 年又发明了直接转矩控制(DTC)技术,这些都是高性能的优秀的电动机控制技术。

电机的本质就是一个换能器,电动机将电能转换成机械能,发电机则将机械能转换成电能。而电机的能量转换中关键媒介是电机的电磁转矩。因此,无论是电动形式的调速系统,还是发电形式的电源系统,电机的电磁转矩都是至为重要的关键物理量。直接转矩控制技术就是认识到了电磁转矩在电机控制中的重要性,直接去控制电机的电磁转矩,从而达到了电机运行动态性能好的优良效果。

20 世纪 80 年代,德国学者 M.Denpenbrock 和日本学者 I.TaKahashi 发明了异步电动机的直接转矩控制^[1,2]。1994 年,ABB 公司首次推出了直接转矩控制的异步电动机通用变频器产品,并宣称 ABB 公司今后只发展直接转矩控制系统的产品^[3],将直接转矩控制的工业应用推到了世人瞩目的高度。

20 世纪中后期,永磁材料的性能有较大的提高,因此,永磁同步电动机在工业上得到广泛应用。为了提高永磁同步电动机调速系统的性能,直接转矩控制技术在 1986 年异步电动机上取得成功后,自然迫切希望在永磁同步电动机调速系统中得到应用。想当年,20 世纪 70 年代异步电动机矢量控制技术成功后,矢量控制技术立即轻而易举地推广到了正弦波永磁同步电动机,当初人们估计 DTC 技术的推广也问题不大,可是,出人意料的是,从 1986 年到 1996 年努力了十年并未成功。这十年中,确实有两三篇论文声称解决了正弦波永磁同步电动机 DTC 技术的问题,但仔细阅读就会发现,它们不是真正意义上的 DTC 技术,因为它们和矢量控制一样,还是有电流环,还是通过控制电流来间接控制电磁转矩,而不是用空间电压矢量直接去控制电磁转矩,因此不能说是 DTC 技术。迟迟不能将异步电动机的 DTC 技术推广到正弦波永磁同步电动机的原因是,异步电动机的 DTC 技术是建立在转差概念上,而永磁同步电动机没有转差,因此,要像矢量控制那样简单地推广是不可能的,必须进行一定的创新才行。直到 1996 年澳大利亚新南威尔士大学和中国南京航空航天大学的研究小组合作研发出了第一款具有真正“直接转矩控制”意义的正弦波永磁同步电动机 DTC 系统后才算克服了这个瓶颈^[4,5]。1997 年以后,关于正弦波永磁同步电动机 DTC 技术方面的论文发表数量猛增,成果累累。其后,DTC 技术又被推广到了电励磁同步电动机调速系统、无刷直流电动机调速系统和永磁容错电动机系统,形势确实一片大好。但是,当我们冷静地

坐下来仔细地审视这些系统时，就非常惊讶地发现，这些被开发的系统在理论上竟如此的苍白，还存在许多不完善的地方。例如，在1996年最早提出正弦波永磁同步电动机DTC系统的参考文献[4, 5]中，为什么要模仿异步电动机DTC系统，也将定子磁链的幅值控制成恒值？这个问题就没有交代清楚。诸如此类的问题还有很多，在此不一一列举，读者在本书有关章节都会看到。就是这些模糊概念和不完整的、不坚实的理论基础已严重影响了该领域的研究，作者深感有进一步健全和完善永磁同步电动机DTC理论的必要，于是，作者开展了第二轮的再研究。在经过第二轮的再研究后，作者不仅对这些模糊概念有了更深一步的新认识，更重要的是对永磁同步电动机DTC技术的认识有了一个质的提高。本书就是基于作者第二轮再研究后的认识撰写出来的。

从以上可以看到，20多年来DTC技术无论是对电动机调速方面还是在发电方面都有许多引人注目的成绩，这么多的成果如想归于一籍，显然是不可能的。因此，本书不打算系统地阐述直接转矩控制的全部内容，而只打算介绍作者亲身研究的成果和内容，这样安排，本书会有具有大量真实可靠的仿真、实验的数据和波形的优点，但可能也会有DTC技术的某些重要内容没有涉及的缺点。

由于作者在直接转矩控制方面做了较多的工作，为了较详细地反映作者所做的工作，打算用两本书来介绍这些内容。第一本书《异步电机（电动、发电）直接转矩控制系统》介绍异步电动机和异步发电机的DTC技术，该书已于2012年由机械工业出版社出版。本书是第二本书，专门介绍永磁同步电动机的直接转矩控制技术。

本书共15章，除绪言、第1章、第15章外共分三部分，第一部分是第2~7章，研究正弦波永磁同步电动机DTC控制系统，成果是解决了诸如要不要“将定子磁链的幅值控制成恒值”等若干重要理论问题，从而提出了正弦波永磁同步电动机DTC控制系统的理论构架；第二部分是第8~11章，研究了无刷直流电动机DTC控制系统，对一些最基础最重要的问题，如无刷直流电动机DTC控制系统中定子磁链幅值控制的问题、零矢量的定义问题都作了一定的研究，为下一步无刷直流电动机DTC控制技术的研究提出了看法；第三部分是第12~14章，研究了容错永磁同步电动机的DTC系统，提出了以相空间电压矢量为基础的永磁容错电动机的相空间电压矢量调制控制策略（P-SVPWM）。这些基础性的研究工作，可能会为永磁同步电动机DTC控制技术的发展起到一砖一瓦的作用。本书的内容主要参考了高瑾博士、杨建飞博士、郝振洋博士、田淳博士的博士学位论文和沈天珉硕士的硕士学位论文，也部分采用了王莹硕士学位论文中的实验结果，在此向他们致谢。

本书对从事电机调速、伺服系统、电动汽车、轨道交通和风力发电系统研发的科研人员和工程技术人员有很好的参考价值，也可作为电气工程类电力电子及电力

传动、电力拖动自动控制、新能源等有关专业师生的教学和科研参考书。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(“永磁容错电机及其控制系统的关键技术研究” 50877035)和台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》(“同步电动机的直接转矩控制” 2001—2002)的资助,在此表示衷心的感谢!在完成书稿的过程中,有许多博士生、硕士生参加了工作,在此也一并表示感谢!

由于作者的水平有限,书中难免有不少错误,敬请读者批评指正。

目 录

前言

绪言	1
第 1 章 永磁同步电动机数学模型	8
1.1 永磁同步电动机介绍	8
1.2 正弦波永磁同步电动机数学模型	10
1.2.1 常用坐标系和坐标变换	10
1.2.2 不同坐标系下的正弦波永磁同步电动机模型	12
1.3 无刷直流电动机数学模型	15
第 2 章 正弦波永磁同步电动机 DTC 理论初探和对其的质疑	16
2.1 异步电动机 DTC 系统关键思想的归纳	16
2.2 正弦波永磁同步电动机 DTC 系统初探	18
2.2.1 定义“负载角”，以代替异步电动机中的“转差”物理量	19
2.2.2 正弦波永磁同步电动机电磁转矩 T_e 的微分表达式	20
2.2.3 1996 年提出的正弦波永磁同步电动机直接转矩控制系统	23
2.3 对 1996 年正弦波永磁同步电动机 DTC 方案的质疑	25
2.4 本章小结	27
第 3 章 零矢量在正弦波永磁同步电动机 DTC 系统中所起的作用	28
3.1 空间电压矢量 u_s 作用后电磁转矩变化的分析	28
3.1.1 正弦波永磁同步电动机数学模型	28
3.1.2 空间电压矢量 u_s 作用后转矩变化的规律及其分类	29
3.2 两种 DTC 系统中转矩变化规律的比较	32
3.2.1 异步电动机 DTC 系统中转矩的变化	32
3.2.2 零矢量在两类电动机中作用的异同	34
3.3 正弦波永磁同步电动机 DTC 系统中应用零矢量的方案	42
3.3.1 探讨 1996 年方案中使用零矢量遭失败的原因	42
3.3.2 应用零矢量的新方案	43
3.4 零矢量改善系统转矩脉动的仿真和实验验证	47
3.4.1 仿真分析	47
3.4.2 实验验证	47
3.5 本章小结	48

第 4 章 正弦波永磁同步电动机直接转矩控制理论的建立	50
4.1 正弦波永磁同步电动机 DTC 系统的理论构架	50
4.1.1 正弦波永磁同步电动机矢量控制理论的构架	51
4.1.2 正弦波永磁同步电动机 DTC 系统的“基本原型机”和其理论构架	52
4.2 正弦波永磁同步电动机 DTC 系统第一层构架理论的建立	53
4.2.1 理论基础	53
4.2.2 定子磁链幅值的限制	57
4.3 正弦波永磁同步电动机第一层构架理论的实现	59
4.4 仿真分析	61
4.4.1 不同负载转矩下磁链轨迹仿真	62
4.4.2 不同转速下的仿真	63
4.4.3 动态性能仿真	64
4.5 实验研究	66
4.5.1 不同负载转矩下磁链轨迹的实验	66
4.5.2 不同转速下转矩脉动的实验	66
4.5.3 动态性能实验	69
4.6 本章小结	69
第 5 章 正弦波永磁同步电动机 DTC 的 $i_{sd}=0$ 控制方案	71
5.1 隐极式永磁同步电动机 DTC 系统 $i_{sd}=0$ 控制方式的理论	71
5.1.1 隐极式永磁同步电动机 DTC 系统 $i_{sd}=0$ 控制理论的建立	72
5.1.2 $i_{sd}=0$ 控制方式和 1996 年控制方案在控制特点方面的比较	74
5.2 隐极式正弦波永磁同步电动机 DTC 系统的准 $i_{sd}=0$ 控制方式	75
5.3 准 $i_{sd}=0$ 直接转矩控制方案的稳态特性仿真	76
5.4 准 $i_{sd}=0$ 直接转矩控制方案的动态特性仿真	78
5.5 实验验证	80
5.6 凸极式永磁同步电动机的 $i_{sd}=0$ 控制方式	82
5.7 本章小结	83
第 6 章 正弦波永磁同步电动机 DTC 的最大转矩电流比控制	84
6.1 隐极式永磁同步电动机 DTC 系统的最大转矩电流比控制	84
6.1.1 最大转矩电流比控制的理论基础	84
6.1.2 最大转矩电流比控制系统的电动机功率因数分析	86
6.1.3 仿真分析	86
6.1.4 实验研究	90
6.2 凸极式永磁同步电动机 DTC 系统的最大转矩电流比控制	94
6.3 本章小结	96

第 7 章	正弦波永磁同步电动机 DTC 的定子磁链幅值恒值控制策略	98
7.1	实际系统的实际运行条件和研究方法	99
7.1.1	实际系统的实际运行条件	99
7.1.2	本章对实际系统的研究方法	101
7.2	“预测控制系统”的仿真研究	101
7.2.1	“预测控制系统”仿真模型的建立	101
7.2.2	稳态运行时电磁转矩给定 T_e^* 波形的形状	103
7.2.3	零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 的设置对减小电磁转矩脉动的效果	104
7.2.4	零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 大小对电磁转矩脉动影响的规律	105
7.2.5	零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 大小对电动机起动时间影响的规律	107
7.3	实验验证	109
7.3.1	零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 的大小对转矩脉动影响规律的实验验证	109
7.3.2	零矢量作用范围对电机起动时间影响规律的实验验证	111
7.4	预测控制系统中电动机电磁转矩脉动的原因及其对策	112
7.4.1	“断续脉动式的空间电压矢量”是电动机转矩脉动的主要原因	113
7.4.2	“预测控制系统”带来的脉动也很可观	114
7.4.3	“电磁转矩给定 T_e^* 的波动”加剧了电动机的转矩脉动	115
7.4.4	减少正弦波永磁同步电动机 DTC 预测控制系统电磁转矩脉动的对策	115
7.5	定量设计转矩调节器的理论基础	117
7.5.1	实验样机运行规律的启示	118
7.5.2	“断续脉动式的空间电压矢量”对转矩脉动的影响规律	119
7.5.3	“电磁转矩给定 T_e^* 的波动”对最优 $2\Delta T_e$ 宽度的影响	122
7.5.4	零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 最优取值的实验验证	125
7.5.5	定量设计转矩调节器基本理论的总结	127
7.6	转矩调节器的定量设计	128
7.6.1	实际工程中最佳零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 的实时确定方法	128
7.6.2	一种简易的零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 确定方法	129
7.6.3	零矢量作用范围 $2\Delta T_e$ 的现场实验确定法	130
7.7	本章小结	130
第 8 章	两相导通方式无刷直流电动机的 DTC 双环控制系统	132
8.1	无刷直流电动机传统的基本控制方法	133
8.2	忽略换相续流时间	135
8.3	无刷直流电动机两相导通方式的数学模型	136
8.3.1	无刷直流电动机的电压方程式	136
8.3.2	无刷直流电动机的转矩方程式	137

8.4	无刷直流电动机 DTC 的理论基础	138
8.4.1	无刷直流电动机 DTC 技术的特殊性	138
8.4.2	两相导通无刷直流电动机中电压矢量的特点	140
8.4.3	定子磁链给定幅值 $ \psi_s ^*$ 的确定和定子磁链实时观察	150
8.4.4	电磁转矩给定 T_e^* 和电磁转矩 T_e 实时观察	154
8.5	基于反电动势形状函数法的无刷直流电动机 DTC 系统构成	156
8.6	仿真及实验结果	159
8.6.1	仿真模型建立及仿真结果	159
8.6.2	实验结果及其分析	161
8.7	本章小结	163
第 9 章	三相导通无刷直流电动机的直接转矩控制	165
9.1	三相导通无刷直流电动机 DTC 的理论基础	166
9.1.1	三相导通控制方式下的空间电压矢量 u_s	166
9.1.2	三相导通无刷直流电动机 DTC 方案中的定子磁链形状	166
9.1.3	给定定子磁链幅值 $ \psi_s ^*$ 的确定	167
9.1.4	定子磁链观测和与磁链给定值 $ \psi_s ^*$ 的比较	169
9.1.5	电磁转矩给定 T_e^* 和电磁转矩 T_e 观测	170
9.2	对“有约束”条件技术路线的评价	171
9.3	无约束的三相导通无刷直流电动机 DTC 系统的构成	171
9.3.1	无约束的三相导通无刷直流电动机 DTC 方式中的换相触发信号	172
9.3.2	无约束的三相导通无刷直流电动机 DTC 系统的构成	173
9.4	仿真和实验	176
9.4.1	仿真波形	177
9.4.2	实验波形及分析	178
9.5	低速性能改进	180
9.5.1	六边形轨迹畸变现象	181
9.5.2	磁链补偿方案的基本思想	181
9.5.3	磁链补偿方案的实现	182
9.5.4	实验结果	183
9.6	本章小结	184
第 10 章	基于动态三维坐标系的无刷直流电动机 DTC 系统	186
10.1	新的思路	186
10.2	三维动态空间正交坐标系	187
10.2.1	三维动态空间正交坐标系中的空间电压矢量 u^s	187
10.2.2	三维动态空间正交坐标系中的定子磁链空间矢量	189

10.3	三维动态空间正交坐标系中的直接转矩控制	190
10.3.1	xy 平面中的控制技术路线	190
10.3.2	xy 平面中的磁链观测与转矩观测	191
10.3.3	基于动态三维坐标系的无刷直流电动机 DTC 系统开关表的建立	192
10.3.4	系统构成	193
10.4	仿真与实验	194
10.5	本章小结	196
第 11 章	单环无刷直流电动机直接转矩控制系统	197
11.1	无刷直流电动机 DTC 系统不必控制定子磁链幅值的估计	197
11.2	两相导通无刷直流电动机 DTC 系统理论的进一步研究	199
11.2.1	电磁转矩快速响应的条件	199
11.2.2	最优空间电压矢量的选择	200
11.2.3	电动机转矩给定 T_e^* 和实时转矩观察 T_e	202
11.2.4	无磁链观测条件下电流的限制	202
11.3	无磁链观测 DTC 的实现	203
11.4	仿真模型的建立及其仿真结果分析	204
11.4.1	仿真模型的建立	204
11.4.2	仿真结果及其分析	205
11.5	实验研究	206
11.6	对无刷直流电动机 DTC 系统初步研究的归纳和评价	207
第 12 章	永磁容错电动机特点及空间电压矢量	209
12.1	电动机容错技术简介	209
12.2	永磁同步电动机的容错系统	209
12.2.1	六相永磁容错电动机的结构及其特点	210
12.2.2	H 桥式逆变器组成的驱动器	212
12.2.3	永磁容错电动机的控制方法	212
12.3	六相永磁容错电动机系统的数学模型	213
12.3.1	六相永磁容错电动机中的一些新概念	213
12.3.2	六相永磁容错电动机的常用坐标系和 6/2 坐标变换	216
12.3.3	六相永磁容错电动机数学模型的建立	218
12.4	六相永磁容错电动机系统的空间电压矢量	219
12.4.1	相空间电压矢量 V_j 组合中的抵消现象	220
12.4.2	总空间电压矢量 u_n 的异构性现象	220
12.4.3	六相永磁容错电动机中总空间电压矢量数据的归纳	223
12.5	本章小结	232

第 13 章 永磁容错电动机直接转矩控制的初步研究	234
13.1 六相永磁容错电动机直接转矩控制系统的构建	234
13.1.1 六相永磁容错电动机 DTC 系统总定子磁链 ψ_s 的计算	235
13.1.2 关于总空间电压矢量的选择	236
13.1.3 永磁容错电动机的直接转矩控制框图	237
13.2 永磁容错电动机 DTC 系统正常态仿真研究	239
13.2.1 仿真模型的搭建	239
13.2.2 仿真结果	240
13.2.3 仿真总结和分析	248
13.3 永磁容错电动机直接转矩控制故障态仿真研究	249
13.4 永磁容错电动机系统实验验证	254
13.4.1 实验条件	254
13.4.2 一相 (d 相) 绕组断路故障的实验验证	255
13.4.3 一相 (d 相) 绕组短路故障的实验验证	256
13.5 本章小结	258
第 14 章 永磁容错电动机的相空间电压矢量调制技术	259
14.1 三相永磁同步电动机 DTC 系统的 SVPWM 控制策略简介	260
14.1.1 正弦波三相永磁同步电动机 DTC 方案的两条技术路线	260
14.1.2 正弦波三相永磁同步电动机 DTC 系统乒乓控制策略的控制要点	261
14.1.3 正弦波三相永磁同步电动机 DTC 系统 SVPWM 控制策略的控制要点	262
14.2 永磁容错电动机 DTC 系统相空间电压矢量控制策略理论基础	265
14.2.1 六相永磁容错电动机 DTC 系统相定子磁链变化量 $\Delta\psi_{sj}$ 的计算	266
14.2.2 正常情况下相定子磁链变化量 $\Delta\psi_{sj}$ 的实现	266
14.2.3 六相永磁容错电动机 DTC 系统控制策略的控制要点	268
14.2.4 永磁同步电动机 DTC 系统三种控制策略的比较	269
14.3 六相永磁容错电动机 P-SVPWM-DTC 系统的正常态运行	270
14.3.1 六相永磁容错电动机 DTC 系统 P-SVPWM 控制策略的控制结构框图	271
14.3.2 六相永磁容错电动机 DTC 系统 P-SVPWM 控制策略的实验验证	271
14.4 六相永磁容错电动机 P-SVPWM-DTC 系统的故障态运行	273
14.4.1 永磁容错电动机 P-SVPWM 系统的容错算法	273
14.4.2 永磁容错电动机 P-SVPWM 系统的仿真研究	277
14.4.3 永磁容错电动机 P-SVPWM 系统的实验验证	279
14.5 本章小结	282
第 15 章 从辩证法来看直接转矩控制技术的发展	283
15.1 电机控制的主要矛盾是对电磁转矩的控制	283

15.2	从矛盾的特殊性看各类电机电磁转矩的差异	284
15.2.1	异步电机电磁转矩的特点	284
15.2.2	正弦波永磁同步电动机电磁转矩的特点	285
15.2.3	无刷直流电动机电磁转矩的特点	286
15.2.4	多相永磁容错电动机电磁转矩的特点	288
15.3	从控制转矩方案的多样性来认识 DTC 技术的多姿多彩的面貌	288
15.3.1	“具体问题具体分析”是辩证法的活的灵魂	288
15.3.2	阶段性地再认识 DTC 技术	289
15.4	矢量控制和直接转矩控制的关系	291
15.4.1	直接转矩控制技术不是矢量控制技术	291
15.4.2	矢量控制实际上是转矩控制的一个分支	292
15.4.3	矢量控制和直接转矩控制关系的一个小结	294
15.5	电机控制技术发展的前景	296
15.5.1	直接转矩控制技术发展的前景	296
15.5.2	让我们迎接新的电机控制技术的诞生	297
15.5.3	新技术都应该在实践中经风雨见世面才能得到发展	297
附录	299
参考文献	304

绪 言

1. 直接转矩控制技术的发展之路

交流电动机的调速技术在 20 世纪 70 年代发生了一个根本性变化，这就是矢量控制的发明向世人证明了交流电动机调速系统完全可以达到直流电动机调速系统同样好的性能。在调速领域内直流调速系统一统天下的局面结束了！这个里程碑式的发明将永远载入调速系统的史册。

矢量控制的创新思维打破了调速领域中沉寂了上百年的僵硬思维框架，在它的影响下，许多种新的调速方案应运而生，例如转差矢量控制、标量控制等，它们都模仿矢量控制解耦的思路，创造了许多种不同的解耦方法，从而也得出了许多种不同类型的新的交流电动机的控制方法，这些方法在发展和应用过程中，相互影响，相互渗透，在调速领域中呈现了一派“百花齐放”的春天景色，这 30 年是交流调速技术发展的黄金时代。

在这些创新方案中，有一个方案越来越得到人们的注意，这就是 1985 年前后推出的直接转矩控制（DTC）技术。这项技术由德国鲁尔大学 Depenbrock 教授和日本 I.Takahashi 教授在 1986 年前后分别提出。Depenbrock 教授提出的方案是将定子磁链轨迹控制成六边形，常把它称为 DSC（Direct Self Control）^[1]。I.Takahashi 教授提出的方案是将定子磁链控制成圆形，常称为 DTC（Direct Torque Control）^[2]。其实，这两个方案的本质都是直接转矩控制（DTC）技术。值得重点提出的是，这两个方案都是为异步电动机提出的，因此，确切地说，1985 年前后发明的直接转矩控制技术是“异步电动机直接转矩控制技术”，它不能广泛地适用于其他类型的电机，本书研究的成果将会证明这一点。

这个方案一提出，就引起了强烈的反响，部分有心人立即敏感地意识到这是一项十分重要的发明。欧洲的 ABB 公司很快就潜心于这项技术的研究。并于 1994 年推出了正式产品。在他们推出异步电动机 DTC 变频器产品的同时，ABB 公司作了大量的商业宣传工作。他们声称，21 世纪将是直接转矩控制技术的世纪，ABB 公司将只研究 DTC 技术，不再研究其他技术^[3]。事实上，ABB 公司真的实现了它的诺言。它们相继推出了 ACS600 和 ACS8000 等系列的直接转矩控制变频器，在电动机调速领域造成了较大的影响。

异步电动机直接转矩控制技术引人瞩目后，很多科学工作者开始转向这个研究方向。他们除对异步电动机 DTC 技术作更深入和完善的研究外，更热衷于开拓 DTC 技术的应用范围。在这里，我们可以稍微回顾一下矢量控制技术的发展史：20 世纪

70年代异步电动机矢量控制成功后,矢量控制技术就是立即从异步电动机轻而易举地开拓到正弦波永磁同步电动机。因此,1985年前后异步电动机DTC技术成功后,把正弦波永磁同步电动机选择为第一个开拓对象应是最顺理成章的事。可是,出人意料的是该推广并非如矢量控制那样“轻而易举”,完全相反,推广工作努力了十年之久,却未获得成功。这十年中,确实有两三篇论文声称解决了正弦波永磁同步电动机DTC技术的问题,但仔细一阅读就会发现,它们不是真正意义上的DTC技术,因为它们和矢量控制一样,还是有电流环,还是通过控制电流来间接控制电磁转矩,而不是用空间电压矢量直接去控制电磁转矩,因此不能说是DTC技术。迟迟不能将异步电动机的DTC技术推广到正弦波永磁同步电动机的原因是,异步电动机的DTC技术是建立在转差概念上,而正弦波永磁同步电动机没有转差,因此,要像矢量控制那样简单地推广是不可能的,必须进行一定的创新才行。直到1996年澳大利亚新南威尔士大学和中国南京航空航天大学的研究小组合作研究的正弦波永磁同步电动机DTC技术才初步在这方面作了尝试^[4, 5]。他们的主要贡献是,在正弦波永磁同步电动机中寻找到了“负载角 δ ”这个物理量,替代了异步电动机中的转差,从而打通了正弦波永磁同步电动机实现直接转矩控制技术的通道。然后,模仿异步电动机DTC技术,将定子磁链的幅值控制成恒值,真正实现了一款没有电流环的、用空间电压矢量直接去控制电磁转矩的正弦波永磁同步电动机直接转矩控制系统。

该方法自提出后引起了国内外学者的广泛关注,并得到了进一步的发展和深入研究,1997年以后,关于正弦波永磁同步电动机DTC技术方面的论文发表数量猛增,成果累累。更可喜的是,研究人员不仅仅限于研究异步电动机和正弦波永磁同步电动机的DTC技术,还将DTC技术推广到了电励磁式同步电动机、异步发电机、无刷直流电动机、容错永磁同步电动机等方面,有的研究人员甚至还把DTC技术用于开关磁阻电机、双馈异步发电机等许多特种电机上,这些努力正在取得喜人的进展。此外,现代控制理论应用于DTC技术的研究成果也可用“正在攻城掠地”来形容,其战绩不可小觑。可见,从1985年DTC技术出现到2014年的近30年的时间中,DTC技术在不断的发展和创新,创造了许多瞩目的成果。正是这些成果,吸引了更多的人才投入到各种DTC技术的研究中去,现在这个队伍正在像滚雪球一样从小迅速壮大,DTC技术的研究工作形势一片大好,我们相信DTC技术将会给人类贡献越来越丰硕的成果。

永磁同步电动机的DTC研究现仍处于初期阶段,它大多沿袭了参考文献[4, 5]中的正弦波永磁同步电动机DTC思想:通过定子磁链幅值和电机转矩的双闭环结构,以控制负载角 δ 实现对电机转矩的有效控制。但是,参考文献[4, 5]发表于1996、1997年,当时毕竟是第一次实现正弦波永磁同步电动机DTC系统,加之迫于时间紧迫的原因,参考文献[4, 5]没来得及在理论方面展开深入的研究,还有很多不完善的地方,这些不完善的地方可能会造成理论和思想的混乱,严重影响正弦波永磁同步电动机DTC理论的发展。例如,参考文献[4, 5]中一再强调,“正弦波永磁同步电

动机 DTC 系统不能采用零矢量, 只能采用六个非零电压矢量”就是一个错误。好在作者的研究团队及时发现了这个问题, 2002 年在国际会议上发表了关于“零矢量在正弦波永磁同步电动机 DTC 系统中的作用”方面的初步定性研究结果^[6], 认定零矢量完全可以也应该在永磁同步电动机 DTC 系统中得到应用, 这才改正了这一错误概念。但是, 还有一些重要的概念仍没有得到澄清, 条理清晰的理论构架没有建立, 例如, 正弦波永磁同步电动机 DTC 系统为什么要模仿异步电动机 DTC 技术, 将定子磁链的幅值控制成恒值? 这个问题就没有交代清楚。这些模糊概念和不完整的、不坚实的理论基础已严重影响了该领域的研究进程。

发现正弦波永磁同步电动机 DTC 系统理论的这些问题后, 作者也对自己团队所做的无刷直流电动机 DTC 系统、容错永磁同步电动机 DTC 系统的研究作了一次审视, 惊讶地发现其中也有不少概念模糊的问题, 这些问题同样阻碍了 DTC 技术在这些永磁同步电动机系统中的健康发展。作者深感有进一步健全和完善整个永磁同步电动机 DTC 理论的必要, 于是, 开展了第二轮永磁同步电动机 DTC 系统理论的再研究。在经过第二轮的再研究后, 作者不仅澄清了永磁同步电动机 DTC 系统理论中的许多模糊概念, 更重要的是对永磁同步电动机 DTC 技术的认识有了一个质的提高。本书就是基于作者第二轮再研究后的认识撰写出来的。

本书的宗旨是试图将永磁同步电动机 DTC 理论推向更高层次进行整合。由于包括本研究团队在内的国内外学者对正弦波永磁同步电动机 DTC 控制系统研究时间较长, 研究成果较多, 条件较成熟, 因此, 本书的重点打算放在正弦波永磁同步电动机 DTC 控制系统上, 将零散的成果进行整合, 并提出正弦波永磁同步电动机 DTC 控制系统的理论构架, 建立正弦波永磁同步电动机 DTC 控制理论较坚实的理论基础; 然后, 在该理论基础上, 进一步向无刷直流电动机、容错永磁同步电动机的 DTC 理论延伸, 做一些基础的工作, 理清一些重要的概念和思想。例如, 无刷直流电动机、容错永磁同步电动机的 DTC 系统中的空间电压矢量是什么模样? 它们和正弦波永磁同步电动机 DTC 系统中的空间电压矢量一模一样吗? 它们的“零矢量”如何定义? 和正弦波永磁同步电动机 DTC 系统中的“零矢量”有区别吗? 它们也和异步电动机 DTC 系统一样, 要将定子磁链的幅值控制成恒值吗? 等等。这些都是 DTC 系统重要的理论基础问题, 只有把这些概念和问题都搞清楚了, 在下一步的研究中, 经过大量的全方位的仿真、实验数据的积累, 才有可能建立起无刷直流电动机、容错永磁同步电动机 DTC 系统的理论构架, 进而使整个永磁同步电动机 DTC 理论逐渐走向成熟。

2. DTC 技术的一些重要特征

(1) 突出电磁转矩在电机控制中的重要性

电机包括电动机和发电机两种, 从能量传递的观点出发, 不管是发电机还是电动机, 电机总是机械能和电能交换的换能器, 能量的交换都是通过电机中形成电磁转矩而完成的, 因此电磁转矩是能量交换的关键媒介。由此可见, 控制电磁转矩

是电机控制中最根本的一环。DTC 技术就是认识了这种重要性，以电磁转矩为直接控制的目标，用空间电压矢量快速控制电磁转矩，这对那些有快速要求的系统来说应是最佳的选择。

(2) DTC 系统是电压控制型系统

逆变器有电流型逆变器和电压型逆变器之分，在电机控制中也有电流型控制和电压型控制之分。凡是通过电流去控制目标量的，划为电流型控制。因为它通过控制电流去控制目标量，因此，它的快速性受到电流环时间常数的限制。而通过电压（通常是指空间电压矢量）去控制目标量的则划为电压型控制，这种系统没有电流环，它在本质上具有快速性的优势。

矢量控制的思想是模仿直流电机的控制，通过控制两个垂直的电流来实现电机的控制，自然，它属于电流型控制。它的快速性受到电流环时间常数的限制，而这个电流环包括了电机的电感，电感的电流是不能突变的，必须根据它的时间常数来决定它的变化规律。因此，它的快速性和电机的电感有很大关系。而直接转矩控制没有电流环，根据系统性能要求的不同，它的控制目标可能是定子磁链幅值和电磁转矩，也可能只是电磁转矩，但是，不管哪种方式，控制手段均为空间电压矢量。可见，DTC 方案中的控制手段不是电流，而是空间电压矢量。对于电感来说，电流不能突变，而电压是可以突变的。因此，空间电压矢量可以直接加于电机的定子电感上，没有过渡时间，这就是 DTC 系统有快速优点的理论依据。

从这样的分析可以看到，矢量控制和 DTC 在控制手段上是完全不同的。当然，在这两个控制方法发明之后，几十年中各自都在取长补短，有很大发展。例如发展的矢量控制也用了空间电压矢量，发展的 DTC 中也有人考虑了电流的因素等，但是最初的初衷才最反映各自的本质，因此我们把矢量控制归于电流控制型系统，而 DTC 归于电压型控制。

DTC 系统用空间电压矢量作为它的激励手段和电机是电感性的事实相匹配，赢得了动态性能好的先机。但是，这一点是要付出代价的，它付出的代价也就在于由于电流不直接控制，会使电流脉动增大，特别在起动时，会产生较大的冲击电流。如果电机定子的电感很小时，电流冲击甚至会使电机无法起动，由于永磁同步电机的定子电感通常比异步电动机小，电流冲击会更厉害。

(3) DTC 系统是有差系统，而矢量控制是无差系统

DTC 系统的乒乓控制方案简单易行，但它是一个有差系统，它的两个滞环使定子磁链和电磁转矩的控制理论上都不是准确的，都是有一个误差带的。这就导致了 DTC 系统电磁转矩脉动较大。而矢量控制是一种无差系统，它优美而完备的理论使电流在理论上能够得到准确的控制，从而能保证矢量控制的调速系统有更小的电磁转矩脉动。

直接转矩控制的这种有差，不仅表现在动态，就是在稳态，定子磁链和电磁转矩也都永远处于比较和升降之中，它们一直在不停地脉动，只有它们的平均值才跟