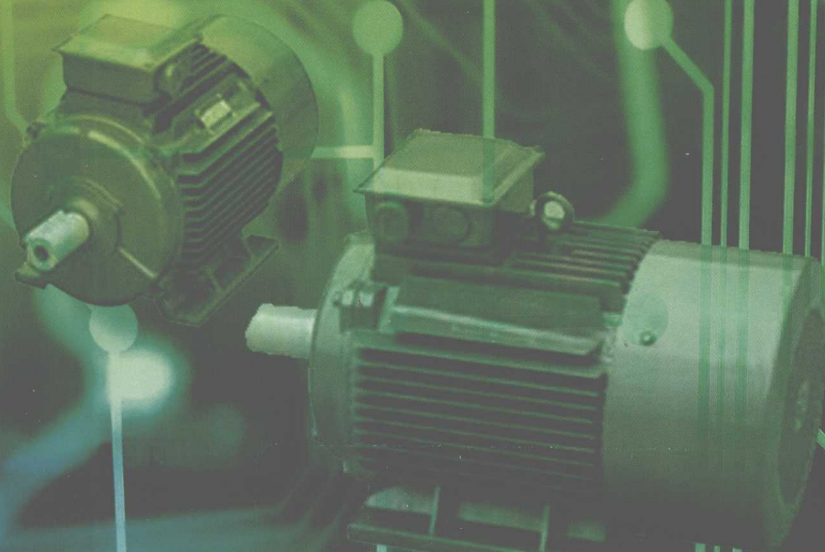


国家自然科学基金资助项目

异步电机 (电动、发电) 直接转矩控制系统



NLIC2970801866

胡育文 黄文新 张兰红 李磊 © 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国家自然科学基金资助项目

异步电机(电动、发电) 直接转矩控制系统

胡育文 黄文新 张兰红 李磊 著



NLIC2970801866



机械工业出版社

本书有两部分内容：一部分为异步电动机直接转矩控制（DTC）技术的进一步研究；另一部分为异步发电机瞬时转矩控制（ITC）技术。本书除详细介绍了笔者们在电动运行方面所做的进一步改进性能的工作外，重点阐述了笔者们将直接转矩控制的概念用于异步发电机的发电系统而提出的异步发电机瞬时转矩控制策略。该技术极大地提高了异步发电机发电系统的动态性能并扩大了有效发电的转速范围，使飞机、坦克、汽车等独立电源系统和风力发电系统的发电质量大为提高。本书中有笔者们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。

本书可供从事研究电机调速、伺服系统、飞机、坦克、汽车等独立电源系统和风力发电的研究所、企业、高等院校的开发人员阅读，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

异步电机（电动、发电）直接转矩控制系统/胡育文等著. —北京：机械工业出版社，2012.4

ISBN 978-7-111-37742-9

I. ①异… II. ①胡… III. ①异步电机—直接转矩控制
IV. ①TM343

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 046591 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：顾谦

版式设计：霍永明 责任校对：樊钟英

封面设计：赵颖喆 责任印制：乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷（三河市胜利装订厂装订）

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 306 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-37742-9

定价：49.80 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

封面防伪标均为盗版

前 言

20 世纪七八十年代是交流电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技术，这些都是高性能的优秀的电机控制策略。

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关重要的物理量。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. Depenbrock 和日本学者 I. Takahashi 发明了异步电动机的直接转矩控制。在 90 年代，南京航空航天大学 and 澳大利亚新南威尔士大学合作，将直接转矩控制技术推广到了永磁电机调速系统。其后，又在包括南京航空航天大学在内的一些大学和科研院所的努力下，将直接转矩控制技术推广到了电励磁同步电机调速系统和无刷直流电机调速系统，使直接转矩控制理论在非常广泛的多类电机调速系统中得到了应用。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，将直接转矩控制的工业应用推到了世人瞩目的高潮。

另一方面，异步发电机的发电系统也以其电机坚固可靠和价廉一直受到人们的极大关注。但是，它的发电性能太差使其应用受到极大限制。笔者将直接转矩控制技术应用于异步发电机的发电系统，大大提高了异步发电机发电系统的发电性能，使异步发电系统能用于风力发电系统和诸如飞机、汽车等有高性能要求的独立电源系统，这是直接转矩控制技术在调速系统以外的领域——电源系统中取得的显著成果。

从以上可以看到，20 多年来直接转矩控制无论是对电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，而只打算介绍笔者们亲身研究的成果和内容，因此，本书会有书中有大量真实可靠的仿真、实验数据和波形的优点，但可能也会有直接转矩控制技术的某些重要内容没有涉及的缺点。

由于笔者们在直接转矩控制方面作了较多的工作，为了较详细地反映笔者们所做的工作，笔者们打算用两本书来介绍这些内容。本书介绍异步电机直接转矩控制技术，主要包括异步电动机直接转矩控制调速系统性能改进的研究和新提出的异步

发电机瞬时转矩控制（ITC）策略，也涉及它们的应用和容错技术。而另一本书则会介绍永磁同步电机的直接转矩控制技术，它将择时出版。

本书内容共分3篇：第1篇为异步电动机直接转矩控制技术，重点介绍笔者们在前人提出的异步电动机直接转矩控制理论的基础上，在提高异步电动机调速性能方面所作的工作；第2篇为笔者们新提出的异步发电机瞬时转矩控制技术，详细阐述该策略的理论、仿真和实验；第3篇为异步电动机的直接转矩控制技术和异步发电机的瞬时转矩控制技术的具体应用，并介绍它们的容错技术。本书的内容主要参考了李磊博士、黄文新博士、张兰红博士的博士学位论文和汤立新、许越的硕士学位论文。

本书对从事风力发电、电力传动系统和从事汽车、航空、坦克等独立电源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（“基于鼠笼异步电机高压直流起动发电系统关键技术”50177014）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，如杨建飞博士、沈天珉硕士、王莹硕士等，在此也一一表示感谢！

由于笔者们的水平有限，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 篇 异步电动机直接转矩控制技术	8
---------------------------	---

第 1 章 异步电动机直接转矩控制的基本理论	8
------------------------------	---

1.1 定子磁链为圆形的直接转矩控制系统	8
----------------------------	---

1.1.1 异步电动机定子磁链的控制	8
--------------------------	---

1.1.2 异步电动机电磁转矩计算	10
-------------------------	----

1.1.3 提升或降低 T_e 的方法	10
-----------------------------	----

1.1.4 综合选择空间电压矢量	12
------------------------	----

1.1.5 系统实现	13
------------------	----

1.2 定子磁链为六边形的直接转矩控制系统	14
-----------------------------	----

1.2.1 定子磁链为六边形的直接转矩控制的理论基础	14
----------------------------------	----

1.2.2 六边形磁链控制法的控制方案	16
---------------------------	----

1.3 本章小结	17
----------------	----

第 2 章 异步电动机直接转矩控制系统提高运行性能的研究	18
------------------------------------	----

2.1 异步电动机直接转矩控制系统存在问题的分析	18
--------------------------------	----

2.1.1 定子电阻 R_s 误差对 DTC 运行性能的影响	18
--	----

2.1.2 纯积分器对 DTC 运行性能的影响	20
-------------------------------	----

2.2 异步电动机定子电阻 R_s 的实时测量	23
---------------------------------	----

2.3 电动机运行中定子电阻 R_s 阻值变动的影响因素	25
--------------------------------------	----

2.3.1 定子电流 i_s 、转速 n 、通电时间 t 对定子电阻 R_s 的影响	25
--	----

2.3.2 逆变器高次谐波对定子电阻 R_s 的影响	27
------------------------------------	----

2.3.3 电源电压波动对定子电阻 R_s 的影响	27
-----------------------------------	----

2.4 用模糊观测器辨识电动机运行时定子电阻值的变化	28
----------------------------------	----

2.4.1 模糊观测器的建立	28
----------------------	----

2.4.2 实际运行计算	40
--------------------	----

2.4.3 实验结果	41
------------------	----

2.5 纯积分器的改进技术	43
---------------------	----

2.5.1 用低通滤波器代替纯积分器消除直流偏移分量	44
----------------------------------	----

2.5.2 三类改进型积分器的应用	46
-------------------------	----

2.5.3 第二类改进型积分器的性能仿真	50
----------------------------	----

2.6 高性能定子磁链观测器的设计	52
2.6.1 异步电动机动态数学模型	53
2.6.2 异步电动机的全阶闭环磁链观测器	53
2.6.3 磁链观测器的求解方法	59
2.6.4 磁链观测器的数字化实现	62
2.6.5 磁链观测器观测定子磁链的效果及电动机参数变化的影响	63
2.7 异步电动机直接转矩控制系统的无速度传感器技术	65
2.7.1 与磁链观测器相结合的简单速度估计器	66
2.7.2 基于模型参考自适应的速度自适应观测器(自适应方案一)	68
2.7.3 有转子磁链信息介入的速度自适应观测器(自适应方案二)	70
2.7.4 两种自适应速度辨识方案的对比	73
2.8 定子电阻的自适应辨识	75
2.9 一种新型的死区补偿方法	76
2.9.1 死区效应的分析	77
2.9.2 一种新型的死区补偿方法	78
2.9.3 实验结果	80
2.10 一种新型的定子磁链和转矩的双层滞环控制	81
2.10.1 直接转矩控制系统的转矩变化规律	81
2.10.2 一种新型的定子磁链和转矩的双层滞环控制	83
2.11 DTC系统的起动限流措施	87
第2篇 异步发电机瞬时转矩控制技术	90
第1章 异步发电机发电理论概述	90
1.1 异步发电机自励发电的基本理论	93
1.1.1 异步发电机电容自励的励磁分析	93
1.1.2 电容自励异步发电机的外特性	94
1.1.3 电容自励异步发电机的端电压调节方法	95
1.2 带有电力电子变换器的异步发电机技术特点	96
第2章 异步发电机瞬时转矩控制技术基本原理和结构	98
2.1 传统的交流发电机调压方法——调磁调压法	99
2.1.1 交流发电机传统的调磁调压原理	99
2.1.2 传统调磁调压方法动态特性欠佳的原因初探	100
2.2 异步发电机直流馈电系统的瞬时转矩控制原理	101
2.3 异步发电机瞬时转矩控制系统的基本结构	103
2.4 磁链给定与转矩给定	106
2.4.1 磁链给定值的确定	106
2.4.2 转矩给定值的确定	108
2.5 瞬时转矩控制异步发电机直流馈电系统的建压过程	109

2.5.1 发电运行状态的建立	109
2.5.2 发电建压控制过程	109
2.6 异步发电机直流馈电系统的仿真研究	110
2.6.1 异步发电机 Simulink/PSB 仿真模型的建立	111
2.6.2 异步发电机直流馈电系统仿真模型的建立	113
2.6.3 仿真条件	115
2.6.4 瞬时转矩控制异步发电机直流馈电系统仿真结果	115
2.7 瞬时转矩控制异步发电机直流馈电系统的初步实验结果	118
2.7.1 建压过程实验结果	118
2.7.2 恒功率区稳态和动态特性的实验结果	119
2.8 本章小结	121
第3章 含有输出电流信息的瞬时转矩控制技术	123
3.1 再探交流发电机传统调磁调压方法动态特性欠佳的原因	123
3.2 含有输出电流信息的瞬时转矩控制异步发电机直流馈电系统	124
第4章 瞬时转矩控制中的空间电压矢量调制 (SVM) 技术	129
4.1 瞬时转矩控制中异步发电机的转矩脉动对输出电压的影响	129
4.2 SVM 调制策略简介	130
4.3 SVM 瞬时转矩控制系统中所需空间电压矢量的确定	131
4.3.1 确定所需要空间电压矢量的预订目标	131
4.3.2 所需空间电压矢量的确定	132
4.4 异步发电机的 SVM-ITC 控制策略的仿真研究	134
4.5 异步发电机的 SVM-ITC 控制策略试验结果	136
第5章 宽转速变化范围的异步发电机瞬时转矩控制系统	139
5.1 异步发电机的外特性和新的需求	139
5.2 宽转速变化范围内异步发电机发电系统瞬时转矩控制的调压原理	140
5.3 18kW 异步发电机基本瞬时转矩控制系统的补充实验	145
5.4 异步发电机瞬时转矩控制系统电压泵升能力的仿真研究	146
5.4.1 异步发电机瞬时转矩控制系统有电压泵升能力的仿真实验	146
5.4.2 异步发电机瞬时转矩控制系统电压泵升能力大小的仿真	148
5.5 瞬时转矩控制系统在电压泵升条件下的建压过程及其仿真	154
5.5.1 转速为额定值 4000r/min 的建压过程仿真	154
5.5.2 转速在恒转矩区 2000r/min 时建压过程仿真	155
5.6 18kW 异步发电机瞬时转矩控制系统在电压泵升条件下发电性能的仿真	156
5.7 18kW 宽转速变化范围的异步发电机瞬时转矩控制系统的实验验证	158
5.7.1 建压过程实验结果	158
5.7.2 稳态与动态实验结果	159
5.8 本实验结果与国外相关系统的比较	162
5.9 本章小结	163

第3篇 异步电机直接转矩控制技术 的应用及其容错技术	165
第1章 异步电机启动/发电系统设计的基本思想和系统构架	165
1.1 启动/发电系统工作原理和基本概况	165
1.2 启动/发电系统的特殊技术问题	168
1.3 异步电机启动/发电系统的组成	169
1.4 异步电机启动/发电系统的综合设计思想	170
第2章 异步电机的启动运行控制	173
2.1 定子绕组不同联结时的直接转矩控制	173
2.1.1 定子绕组星形联结时电机中的电压、电流矢量	173
2.1.2 定子绕组三角形联结时电机中的电压、电流矢量	174
2.1.3 定子绕组星形联结与三角形联结时电机中空间电压矢量的比较	174
2.1.4 定子绕组星形联结与三角形联结时直接转矩控制结构的比较	175
2.1.5 仿真分析	177
2.2 异步电机的启动限流仿真与启动实验结果	177
第3章 异步电机启动/发电系统启动到发电的转换技术	181
3.1 启动向发电转换的控制机理分析	181
3.2 异步电机启动/发电系统启动向发电转换的仿真与实验结果	183
3.2.1 仿真结果分析	183
3.2.2 实验结果	184
3.3 小结	185
第4章 异步电机控制系统中变换器的故障后保护技术	186
4.1 基于直接转矩控制的异步电机电动系统故障后保护技术	187
4.1.1 逆变器单个开关短路故障	187
4.1.2 逆变器单个开关断路故障	193
4.2 基于瞬时转矩控制的异步发电系统故障后保护技术	197
4.2.1 变换器单个开关短路故障	197
4.2.2 变换器单个开关断路故障	202
4.3 本章小结	205
第5章 基于直接转矩控制的异步电机电动系统重构和容错技术	206
5.1 基于直接转矩控制的异步电机电动系统的容错拓扑	206
5.2 容错型四开关系统的直接转矩控制	207
5.2.1 四开关的空间电压矢量	207
5.2.2 磁链与转矩的控制方案	209
5.2.3 四开关两相与四开关三相容错方案特点的分析与比较	210
5.3 仿真与实验结果	213
5.4 小结	214
第6章 基于瞬时转矩控制的异步电机发电系统重构和容错技术	216

6.1 基于瞬时转矩控制的异步发电系统的容错技术	216
6.1.1 对常见故障的容错拓扑	216
6.1.2 容错后四开关三相系统的瞬时转矩控制	217
6.2 容错系统关键问题讨论	217
6.2.1 容错后最大输出功率	217
6.2.2 电容电压漂移及其抑制方法	219
6.2.3 电容的选取	219
6.3 仿真与实验研究	220
6.4 容错四开关三相异步发电系统的 SVM 技术	221
6.4.1 四开关三相异步发电系统中的 SVM 方法	222
6.4.2 仿真与实验	225
6.4.3 小结	228
附录	229
附录 A 异步电机定子电阻的测量数据	229
附录 B 1.1kW 异步电机的型号参数	231
附录 C 2.2kW 实验机组中的直流电机及异步电机的型号参数	231
附录 D 18kW 异步起动/发电系统异步电机参数	232
附录 E 主要物理量表	233
参考文献	236

绪 言

1. 直接转矩控制技术的发展之路

交流电机的调速技术在 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机调速系统完全可以达到直流电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技术。这项技术首先是由德国鲁尔大学 Depenbrock 教授于 1985 年提出，他发现直接去控制异步电动机的电磁转矩和电机定子磁链，而删去电流闭环有更好的动态性能。特别是在大功率机车中，若定子磁链控制成六边形，则能减少功率管的切换次数，大大改善电力电子器件的发热性能。这种控制方法，他们叫它直接自控制（Direct Self Control, DSC）。1987 年，把它推广到弱磁调速范围。1985 年和 1987 年的文献都是以德文形式发表，1988 年再以英文形式发表在 IEEE 杂志上^[1]。定子磁链六边形方案虽然控制简单，但它使电机的电磁转矩脉动加大。在大功率的牵引机车中，由于有很大的惯性，这些转矩脉动能被大惯量滤去，转速不会出现明显波动。但是，在中小功率系统中，这种转矩脉动会使转速波动到不允许的地步，因此希望定子磁链控制成圆形而不是六边形。于是，1986 年日本 I. Takahashi（高橋勲）教授提出了定子磁链为圆形的异步电动机直接转矩控制方案^[2]。定子磁链为圆形的异步电动机直接转矩控制常称为 DTC（Direct Torque Control，直接转矩控制）。这两个方案一提出，就引起了强烈的反响，部分有心人立即敏感到这是一个十分重要的发明。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 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 公司真的实现了他的诺言。从 1994 年到 2011 年的十多年中，它们相继推出了 ACS600 和

ACS8000 系列直接转矩控制变频器。遗憾的是在学术会议和杂志中很少有 ABB 公司发表的关于直接转矩控制技术的论文，即使发现一两篇，关键的控制方法等也都被隐去，这可能是由于商业秘密的原因，不得不如此运作。但不管如何，异步电动机直接转矩控制技术被 ABB 公司推广于世后，造成了较大的影响，这是不争的事实。

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。其中，一部分人从事对异步电动机 DTC 技术作更深入和完善的研究，我们称他们从纵向展开研究，纵向的研究使异步电动机 DTC 调速系统越来越完美、性能越来越好，使 DTC 的产品越来越适用于各种重要场合。在这方面，ABB 公司作出了杰出的贡献。

还有一部分人在从事横向的开拓工作，他们走出异步电动机调速的范畴，而放眼其他电机的直接转矩控制技术的研究，在更宽泛的范围去认识电磁转矩控制的本质和规律，以便开发更多的新产品。横向的研究使人们对直接转矩控制的本质了解得越来越清楚，从不同的侧面互相比较使人们对该技术的认识越来越深刻，这样能使直接转矩控制的理论升华到一个更新的境界，从而有希望创造出更加完美的系统。

和矢量控制类似，DTC 技术横向开拓的第一个对象也是选择正弦永磁同步电动机。当 20 世纪 70 年代异步电动机矢量控制成功后，矢量控制技术立即轻而易举地从异步电动机推广到正弦永磁同步电动机。因此，1986 年异步电动机 DTC 技术成功后，将异步电动机 DTC 技术推广到正弦永磁同步电动机是最顺理成章的事。可是，出人意料的是努力了 10 年并未成功。这 10 年中，确实有两三篇论文声称解决了正弦永磁同步电动机 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 技术推广到正弦永磁同步电动机的原因是：异步电动机的 DTC 技术是建筑在转差概念上的，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我国南京航空航天大学的研究小组合作研究的正弦永磁同步电动机 DTC 技术才初步解决了这一问题^[4,5]。此后，DTC 技术向两个方向急速发展：一是将 DTC 技术应用到新的电机机种；二是将现代控制理论用于 DTC 技术，这两个方向都取得了许多惊人的成果。例如，1997 年笔者的课题组开始研究电励磁式同步电动机 DTC 技术；1999 年左右 ABB 公司推出了电励磁式同步电机的直接转矩控制系统 ACS6000；1998 年笔者的课题组又开始研究异步发电机的 DTC 技术；2005 年左右英国 Sheffield 大学 Z. Q. Zhu 教授发表了无刷直流电机 DTC 技术的论文……现在，正弦永磁同步电动机的 DTC 技术、电励磁式同

步电动机的 DTC 技术、异步发电机的 DTC 技术、无刷直流电动机的 DTC 技术等方面的研究发展都非常快, 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, 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 2011 年的 20 多年的时间中, 不管是从事纵向研究的人还是从事横向研究的人, 都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。

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, 不管电机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。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的, 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, 它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, 它的控制目标是两个: 定子磁链和电磁转矩, 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，特别在起动机时，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，好在异步电动机的定子电感都较大，电流冲击会受到抑制，一般不会出现这种不良现象。

(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，它们一直在不停的脉动，只有它们的平均值才跟踪给定值。这个理论上的特点，铸造了它的动态性能快的优点，但也带来脉动大的缺点。

事实上，武断地将 DTC 系统认定成有差系统，将矢量控制认定成无差系统是不科学的，DTC 系统通过预测技术和空间电压调制（SVM）技术正在向无差系统靠拢，而矢量控制尽管在理论上是无差系统，但是由于逆变器中只有六个开关管，实践中并不能做到真正的无差。随着技术的发展，这两个系统在有差和无差方面的差别将会淡化。

(4) DTC 系统的设计思想是逆变器和电机一体化设计，而初期的矢量控制则只考虑电机，不考虑逆变器

DTC 系统控制特点是考虑了逆变器的具体开关情况，明确地指出电机中不可能有连续的控制，而只能由 8 个断续的空间电压矢量来调理电机定子磁链、电磁转矩等物理量。但早期的矢量控制没有考虑逆变器，它的注意力是模仿直流电机的控制，解决交流电机内部的解耦问题，建立完整的解耦理论和策略，从而使其能够应用严谨的线性控制理论。至于具体实现问题则放在后一步。因此，在具体实现时，矢量控制那么完美的理论在只有 6 个开关管的逆变器的条件下其实是不可能实现的，它还是要受逆变器断续控制的影响。不过，由于它的理论是无差的，又有电流环控制，尽管它的电磁转矩存在脉动，但比 DTC 系统要小。

(5) DTC 系统的解耦不彻底

矢量控制给世人的启示是，如果对交流电机解耦彻底的话，它的控制性能可以很好。矢量控制就是模仿直流电机将三相电流分解成互成垂直的励磁电流和驱动电流。由于励磁电流和驱动电流严格垂直，所以它们必定是解耦的。DTC 方案是利用一个简单非线性的乒乓控制，即定子磁链滞环和转矩滞环将控制的定子磁链、电

磁转矩解耦的,得到了很好的动态效果。但是,一个空间电压矢量在改变定子磁链的同时,也会使电磁转矩发生变化,因此 DTC 系统的解耦是不彻底的。

(6) 直接转矩控制对电机参数的依赖程度最小,不要进行旋转坐标与静止坐标之间的转换

从异步电机直接转矩控制整个控制过程可以看到,只有在计算定子磁链时用到了定子电阻,而且在转速不太低时,定子电阻的影响还可以忽略不计。这是直接转矩控制一个很大的优点,这比矢量控制要依赖大量电机参数有利得多。但是,这个定子电阻参数在低速时还是严重影响直接转矩控制的运行性能,不能不认真对待。

直接转矩控制还有一个优势是在整个计算和控制过程中,这些运作都在静止的定子坐标系中进行,而不必在静止坐标系和转动坐标系中频繁转换,这给计算和控制带来了较多的方便。

(7) 新控制方法层出不穷,相互渗透,不断改进

自 1972 年矢量控制提出后,交流电机的控制方法不是只产生一个 DTC 控制方法,而是产生了相当多的控制方法,只不过 DTC 控制方法是除矢量控制以外最受欢迎的一种。这些控制方法在几十年的发展过程中,正在相互学习、相互渗透,例如 DTC 系统在学习矢量控制无差而严谨的理论,从原始的乒乓滞环控制走出来,用 SVM 和预测的方法,开始进行定子磁链、电磁转矩的无差控制。而矢量控制则学习 DTC 系统,在考虑电机的同时,也考虑逆变器,并运用八个空间电压矢量来控制电流。我们相信:

1) 这些新的控制方法各有特色,各有用武之地,是相互补充,而不是相互排斥,例如,在需要动态性能好的地方,DTC 系统可能更占优势,在需要脉动小的地方,矢量控制可能更占优势。世界的多样性、需求的多样性决定了控制系统也应该是多样性的。

2) 多种控制系统从不同的角度揭示了运动系统的本质,使人们能从中加深认识,并发现更高层次的运动系统和控制方法,它们的发展应该是没有止境的。对于 DTC 系统来讲,虽然它已经显示了动态性能好的优点,但是,也暴露了许多缺点。这些缺点正激励人们去建立更完善的 DTC 控制系统的理论,创造更好的控制方法,它的发展空间还很大。

以上就是我们 20 多年来研究 DTC 系统获得的一点心得。我们的工作只是沧海一粟,我们非常希望我们这支小小的支流能汇入大海,和广大电机控制科技工作者一道,继续推进 DTC 系统的研究。

3. 本书的内容和撰写思路

我课题组对 DTC 技术的研究始于 1986 年,笔者那年正在日本留学访问,在阅读日文资料的过程中,发现了日本 I. Takahashi (高橋勲) 教授刚发明的定子磁链为圆形的异步电动机直接转矩控制技术,笔者当时就敏感到这是一个重要的发明,

于是立即把精力从别的项目上转移过来，潜心研究异步电动机直接转矩控制。不久笔者见到了 I. Takahashi 教授，当面向他请教了直接转矩控制技术。I. Takahashi 教授非常友好的给予了长时间的指教，并让他的中国留学生寄来了他的直接转矩控制实验资料，给予了我们很多帮助。可惜的是，I. Takahashi 教授，这位为直接转矩控制技术作出过杰出贡献的人，过早地离开了我们。今天，当我们总结我们在直接转矩控制方面所作的工作时，不能不缅怀曾经给予过我们帮助的 I. Takahashi 教授。

日本留学访问一年后，笔者回国，便带了许多硕士生和博士生开始了对 DTC 技术的研究，一直至今。1986 ~ 1995 年，我课题组主要研究的是异步电动机 DTC 系统。当时了解和研究 DTC 技术的人还不多，1994 年 ABB 公司推出 DTC 正式产品并作了大量的商业宣传工作后，DTC 技术突然引起人们巨大的关注，纷纷开始研究 DTC 技术。在此形势下，1995 年笔者受澳大利亚新南威尔士大学 M. F. Rahman 教授邀请，来到新南威尔士大学开始了两校（澳大利亚新南威尔士大学和中国南京航空航天大学）在 DTC 技术研究方面的合作。这十多年来，两校教师多次互访，派遣博士生，共同发表论文，取得了喜人的成果。正弦永磁同步电动机 DTC 技术就是笔者 1995 ~ 1996 年在澳大利亚作访问学者期间双方共同研究成功的。我们两个团队在良好合作的同时，研究方向也有各自的特色，M. F. Rahman 教授领导他的团队在正弦永磁同步电动机 DTC 技术方面做了很多深入的工作，如弱磁、无位置传感器技术、SVM 技术等方面的工作，在 IEEE 杂志和会议上发表了大量的论文。而我课题组则除在正弦永磁同步电动机 DTC 技术的基本理论方面继续做工作外，还花了很大的精力开拓 DTC 技术的横向研究，如异步发电机、无刷直流电动机、电励磁式同步电动机的 DTC 技术研究。

20 多年来研究 DTC 技术的队伍日渐庞大，成果日益增多，一本书是无法把这么多的成果囊括的。由于这个原因，我们干脆放弃面面俱到地阐述 DTC 技术的发展和成果的念头，而仅仅是沿着这 20 多年我课题组研究的轨迹，阐述我课题组所做的一些工作和心得，以便抛砖引玉，和大家共同切磋，将 DTC 技术的研究进一步推向深入。这种安排可能会使本书系统性不强，有跳跃性，特别是可能会没有收集到国内外在 DTC 研究方面的重大成果（包括我们的合作者 M. F. Rahman 教授的成果），在此，我们对创造这些成果的科技工作者表示歉意。

这 20 多年来我课题组对 DTC 技术的研究主要在五个方面：异步电动机 DTC 技术的深入研究、异步发电系统 DTC 技术研究、正弦永磁电动机 DTC 技术研究、无刷直流电机 DTC 技术研究和电励磁式同步电动机 DTC 技术研究。由于内容较多，我们打算分两本书来反映这些内容：第一本书为异步电机 DTC 技术，包括异步电动机 DTC 技术的深入研究和异步发电系统 DTC 新理论、新技术；第二本书为永磁同步电机 DTC 技术，包括正弦永磁电动机、无刷直流电机 DTC 技术，也会涉及和永磁同步电机很类似的电励磁式同步电动机 DTC 技术研究。本书为第一本书。这

两本书的特点是有大量的实验数据和仿真实验波形，这都是本课题组众多的教师、博士生、硕士生 20 年来共同努力的结果，可供研究人员参考。本书基本上没有引用其他人和其他著作的实验数据和波形。为写作逻辑性的需要，个别地方引用了其他人的工作时，书中都注明了出处，一方面是对原著者的尊重，更重要的是让对此感兴趣的研究者便于查阅文献。

由于本书研究的内容有许多是刚开辟的领域，笔者又水平有限，研究还相当不深入，不免有许多不当之处，书中缺点和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。