



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

大功率变频器 及交流传动

High-Power Converters and AC Drives

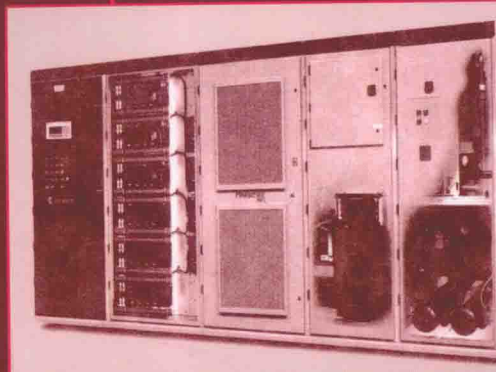
[加拿大] 吴斌 (Bin Wu) 著

卫三民 苏位峰 宇文博 译

李发海 校



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

大功率变频器及交流传动

High-Power Converters and AC Drives

[加拿大] 吴斌 (Bin Wu) 著

卫三民 苏位峰 宇文博 译

李发海 校



机械工业出版社

本书详细而又完整地介绍了大功率变频器及中压交流传动的最新发展技术,包括各种大功率变频器的拓扑结构、脉冲调制方法、先进的控制策略以及工业产品设计经验等。书中包括了250多个图表,对所有主要理论和控制方法,都给出了计算机仿真结果和试验波形。对于实际产品的设计和工业应用中的各种问题,书中也穿插于各章节中进行了详细介绍。

本书是作者20多年大功率变频器设计及应用的经验积累,可作为相关专业本科生和研究生的教材使用;对广大的科研人员、产品设计人员及工程技术人员,本书也有非常好的学习和参考价值。

Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < High-Power Converters and Ac Drives >, ISBN < 978-0-471-73171-9 >, by < Bin Wu >, 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机械工业出版社出版,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,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2015-1912号

图书在版编目(CIP)数据

大功率变频器及交流传动/(加)吴斌著;卫三民,苏位峰,宇文博译. —北京:机械工业出版社,2015.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:High-Power Converters and AC Drives

ISBN 978-7-111-50832-8

I. ①大… II. ①吴… ②卫… ③苏… ④宇… III. ①大功率-变频器-交流电传动 IV. ①TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第154706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:张俊红 责任编辑:张俊红 责任校对:肖琳

封面设计:马精明 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17.75印张·337千字

标准书号:ISBN 978-7-111-50832-8

定价:59.90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

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

最近几年来,中压变频调速技术在风机、泵等负载交流电动机的应用上,取得了非常明显的经济效益和社会效益。这同时也为我国电气传动,尤其是中压大功率变频调速产品打开了一个非常广阔的市场,使得相关技术的研究成为高校、研究所和许多公司的重点和热点问题之一。

本人有幸于2002~2004年在加拿大多伦多的Ryerson大学,Bin Wu博士、教授所创立的电气传动应用及研究试验室(LEDAR)开展博士后工作,目睹并经历了Bin Wu教授著作本书的英文原版书的大部分过程。他博学的知识、严谨的治学态度、缜密的思考、精益求精的作风、一丝不苟的精神,都给我留下了非常深刻的印象。因此我们一直渴望把此书能翻译成中文,为国内相关技术的发展起到促进作用。

2004年回国后,在Bin Wu教授的同意和大力支持下,我和苏位峰博士、宇文博博士后(也曾在LEDAR工作两年)开始了翻译工作。其中,初稿的翻译工作,第1、2、4、5、6章由苏位峰博士完成,第9、10、12、13、14章由宇文博博士后完成,本人完成了其他章节的翻译。此后,我和苏位峰博士还一起对全书的所有章节进行了完整的仔细阅读和大量的修改工作。

在此,非常感谢清华大学李发海教授(本人及苏位峰博士在攻读博士学位时的导师)对本书所有翻译工作给予的指导,并在百忙之中对此书所进行的仔细审校以及提出的所有详细修改意见。尤其是为了结合国内的实际情况,并征得Bin Wu教授的同意,我们对第5章的内容做了较少的改动,和原著稍有不同。

非常感谢郎永强博士后对本书提出的诸多建议和修改意见。同时,向郭伟彰、张和平、余明德等一并表示感谢,感谢他们在翻译工作中给予的所有支持和建议。

本书的翻译工作由于时间仓促,仍然可能有许多翻译不准确或不正确的地方,欢迎大家提出宝贵意见。衷心希望通过我们的翻译,把Bin Wu教授的精心之作推荐给大家,并对国内变频传动行业的发展起到一定的推动作用。

卫三民 于北京

前言

随着电力半导体器件（尤其是 IGBT 和 GCT）的迅速发展，中压大功率传动设备在石油化工、矿山开采、轧钢和冶金、运输等工业领域得到了越来越广泛的应用，节约了电能、增加了产量并提高了产品质量。

虽然专家、学者和技术人员对于中压（2.3 ~ 13.8kV）大功率（1 ~ 100MW）传动系统的研究工作一直在持续进行，但介绍相关最新前沿技术的书籍却并不多见。本书则致力于此，完整而又详尽地介绍了各种大功率变频器的拓扑结构及原理、传动系统的组成，以及与此相关的各种先进控制策略。

本书包括了中压大功率传动领域最新发展的前沿技术，不但通过表格、框图、波形图等给出了系统设计参考，而且还介绍了实际产品设计中的各种关键技术难点及其解决方法。对于所有重要的概念、控制原理和核心控制技术，书中都给出了计算机仿真结果和实际装置的实验波形。本书可作为学术研究、产品开发等专业技术人员或产品工程师的参考。书中同时详细地给出了多个专题的相关技术背景，也非常适合于作为电力电子及交流传动专业的研究生教材。

本书可分为 5 个部分，共 14 章。

第 1 部分为绪论，总体介绍了中压大功率变频器的市场分析、系统结构、工业典型应用、变频器拓扑结构以及各种电力半导体器件等。其中，重点介绍了中压变频器具有普遍意义的关键技术要求和难点（对于低压传动系统来说，从不同角度分析时，关键技术和难点也往往不同）。

第 2 部分介绍多脉波二极管及晶闸管整流器，内容包括中压变频器中为降低网侧线电流畸变常用到的 12、18 和 24 脉波整流器的拓扑结构；同时也介绍了多脉波整流器中经常用到的移相变压器，并详细讨论了基于移相变压器消除主要谐波的原理。

第 3 部分介绍了多电平电压源型逆变器，详细分析并比较了各种多电平电压源型逆变器的拓扑结构，包括典型的中点箝位多电平结构和串联 H 桥多电平结构；在此基础上，介绍了基于载波和基于空间矢量的两大类多电平脉宽调制方法。

第 4 部分讨论了中压逆变器中的 PWM 电流源型逆变器和整流器，分析了梯形波调制方法、特定谐波消除方法以及电流源型变频器的空间矢量调制方法。在这部分中，同时分析了功率因数为 1 的控制方法，以及有源阻尼控制方法。

最后，第 5 部分介绍了大功率交流传动系统，给出了国际上各大公司开发的

电压源型和电流源型变频器，并比较了各种结构的特点和优缺点；此后，介绍了磁场定向矢量控制和直接转矩控制两种最为广泛使用的控制方法。书中力争用最简单和最容易理解的方式把两种控制方法介绍得清晰、简洁。

附录为在研究生课程教学中使用的 12 个基于计算机仿真的教学作业，各教学作业的详细分析和答案可参见指导手册（另单独发行）。指导手册中同时有各章节的讲解演示文稿（基于幻灯片形式）。

最后，谨向 Rockwell Automation（加拿大）公司的同事们表示最诚挚的感谢，尤其是 Steve Rizzo、Navid Zargari 和 Frank DeWinter，感谢和他们进行的无数次技术探讨，感谢 12 年来一起在研究开发中压传动系统中愉快而又富有成效的合作！同时真诚感谢我的恩师，Shashi Dowan 博士和 Gordon Slemon 博士，感谢两位导师在我于 Toronto 大学攻读硕士和博士学位期间的谆谆教导，是他们使得我在大功率传动系统的研究方面受益匪浅！感谢 RPM 工程公司的 Robert Hanna 博士，感谢他对原稿的仔细审读，并提出了很多宝贵的意见！同时，感谢所有在 Ryerson 大学电气传动应用及研究实验室（LEDAR）先后工作过的博士后、博士和硕士生们，感谢他们在准备本书书稿中给予的协助和支持！感谢 ASI Robicon、ABB、Siemens AG 及 Rockwell Automation 公司，感谢他们为书中提供了中压传动系统的照片。最后，非常感谢我的夫人 Janice 及我的女儿 Linda，感谢她们在完成此书期间给予的关心、理解、支持，以及在写作上带来的灵感。

Bin Wu

于加拿大多伦多

目 录

译者序

前言

第1部分 绪 论

第1章 概述	3
1.1 简介	3
1.2 技术难点	5
1.2.1 网侧的技术要求	5
1.2.2 电动机侧的技术要求	6
1.2.3 开关器件的限制	7
1.2.4 对传动系统的整体要求	7
1.3 变频器拓扑结构	7
1.4 中压传动工业产品	9
1.5 小结	12
附录1A 中压传动系统的应用概况	12
参考文献	12
第2章 大功率半导体器件	14
2.1 简介	14
2.2 大功率开关器件	15
2.2.1 二极管	15
2.2.2 普通晶闸管	15
2.2.3 门极关断晶闸管	17
2.2.4 门极换向晶闸管	18
2.2.5 绝缘栅双极型晶体管	21
2.2.6 其他开关器件	22
2.3 器件的串联运行	22
2.3.1 电压不均衡的主要原因	23
2.3.2 GCT 的电压均衡	23
2.3.3 IGBT 的电压均衡	25
2.4 小结	25
参考文献	26

第2部分 多脉波二极管和SCR整流器

第3章 多脉波二极管整流器	29
3.1 简介	29
3.2 6脉波二极管整流器	30
3.2.1 简介	30
3.2.2 容性负载	31
3.2.3 THD 和 PF 的定义	34
3.2.4 标么值系统	35
3.2.5 6脉波二极管整流器的 THD 和 PF	35
3.3 串联型多脉波二极管整流器	37
3.3.1 12脉波串联型二极管整流器	37
3.3.2 18脉波串联型二极管整流器	41
3.3.3 24脉波串联型二极管整流器	43
3.4 分离型多脉波二极管整流器	44
3.4.1 12脉波分离型二极管整流器	44
3.4.2 18和24脉波分离型二极管整流器	47
3.5 小结	49
参考文献	50
第4章 多脉波晶闸管整流器	51
4.1 简介	51
4.2 6脉波晶闸管整流器	51
4.2.1 理想6脉波晶闸管整流器	52
4.2.2 网侧电感的影响	54
4.2.3 THD 和 PF	57
4.3 12脉波晶闸管整流器	58
4.3.1 理想12脉波晶闸管整流器	59
4.3.2 线路电感和变压器漏电感的影响	61
4.3.3 THD 和 PF	62
4.4 18和24脉波晶闸管整流器	62
4.5 小结	64
参考文献	64
第5章 移相变压器	65
5.1 简介	65
5.2 一次侧绕组为Y接二次侧绕组为延边三角形的移相变压器	65
5.2.1 Y/ Δ 型移相变压器	65
5.2.2 Y/ Δ 型移相变压器	66

5.3 一次侧绕组为三角形二次侧绕组为延边三角形的移相变压器	68
5.4 谐波电流的消除	69
5.4.1 谐波电流的相移	69
5.4.2 谐波的消除	71
5.5 小结	72

第3部分 多电平电压源型逆变器

第6章 两电平电压源型逆变器	75
6.1 简介	75
6.2 正弦波脉宽调制	75
6.2.1 调制方法	75
6.2.2 谐波成分	77
6.2.3 过调制	78
6.2.4 三次谐波注入 PWM	78
6.3 空间矢量调制	79
6.3.1 开关状态	80
6.3.2 空间矢量	80
6.3.3 作用时间计算	82
6.3.4 调制因数	84
6.3.5 开关顺序	84
6.3.6 频谱分析	86
6.3.7 偶次谐波的消除	88
6.3.8 不连续空间矢量调制	91
6.4 小结	93
参考文献	93
第7章 串联 H 桥多电平逆变器	95
7.1 简介	95
7.2 H 桥逆变器	95
7.2.1 双极性调制法	95
7.2.2 单极性调制法	97
7.3 多电平逆变器拓扑结构	99
7.3.1 采用相同电压直流电源的串联 H 桥逆变器	99
7.3.2 采用不同电压直流电源的串联 H 桥逆变器	101
7.4 基于载波的 PWM 控制法	102
7.4.1 移相载波调制法	102
7.4.2 移幅载波调制法	106
7.4.3 移相和移幅载波 PWM 方法的比较	110
7.5 阶梯波调制方法	112

7.6 小结	114
参考文献	114
第 8 章 二极管箝位式多电平逆变器	116
8.1 简介	116
8.2 三电平逆变器	116
8.2.1 拓扑结构	116
8.2.2 开关状态	117
8.2.3 换相	118
8.3 空间矢量调制	120
8.3.1 静止空间矢量	121
8.3.2 作用时间计算	122
8.3.3 $\vec{V}_{ref}$ 位置与保持时间之间的关系	124
8.3.4 开关顺序设计	125
8.3.5 逆变器输出波形和谐波含量	128
8.3.6 消除偶次谐波	130
8.4 中点电压控制	133
8.4.1 中点电压偏移的原因	133
8.4.2 电动和再生运行模式的影响	134
8.4.3 中点电压的反馈控制	134
8.5 其他空间矢量调制算法	135
8.5.1 非连续空间矢量调制	136
8.5.2 基于两电平算法的 SVM	136
8.6 多电平二极管箝位式逆变器	136
8.6.1 四、五电平二极管箝位式逆变器	136
8.6.2 基于载波的 PWM	138
8.7 小结	141
附录 8A 采用偶次谐波消除方法的三电平 NPC 逆变器 7 段式开关顺序	141
参考文献	143
第 9 章 其他多电平电压源型逆变器	145
9.1 简介	145
9.2 NPC/H 桥逆变器	145
9.2.1 拓扑结构	145
9.2.2 调制方法	146
9.2.3 波形和谐波分量	147
9.3 多电平电容悬浮式逆变器	148
9.3.1 拓扑结构	148
9.3.2 调制方法	149
9.4 小结	150

参考文献	151
第 4 部分 PWM 电流源型变频器	
第 10 章 PWM 电流源型逆变器	155
10.1 简介	155
10.2 PWM 电流源型逆变器	155
10.2.1 梯形波脉宽调制	157
10.2.2 特定谐波消除法	160
10.3 空间矢量调制	163
10.3.1 开关状态	163
10.3.2 空间矢量	164
10.3.3 作用时间计算	166
10.3.4 开关顺序	167
10.3.5 电流谐波分量	170
10.3.6 SVM、TPWM 和 SHE 的比较	171
10.4 并联电流源型逆变器	171
10.4.1 逆变器拓扑结构	171
10.4.2 并联逆变器空间矢量调制	172
10.4.3 中矢量对直流电流的影响	173
10.4.4 直流电流的平衡控制	175
10.4.5 试验验证	175
10.5 负载换相逆变器	177
10.6 小结	177
附录 10A 图 10-1 中的逆变器采用 SHE 方法时计算的开关角	178
参考文献	179
第 11 章 PWM 电流源型整流器	180
11.1 简介	180
11.2 单桥电流源型整流器	180
11.2.1 简介	180
11.2.2 特定谐波消除法	181
11.2.3 整流器直流输出电压	185
11.2.4 空间矢量调制法	186
11.3 双桥电流源型整流器	186
11.3.1 简介	186
11.3.2 PWM 方法	187
11.3.3 谐波成分	189
11.4 功率因数控制	189
11.4.1 简介	189

11.4.2 α 和 m_a 的同时控制	190
11.4.3 功率因数曲线	192
11.5 有源阻尼控制	194
11.5.1 简介	194
11.5.2 串联和并联谐振模式	194
11.5.3 有源阻尼原理	195
11.5.4 LC 谐振抑制	196
11.5.5 谐波抑制	198
11.5.6 有源阻尼电阻的选择	200
11.6 小结	201
附录 11A 电流源型整流器的开关角	202
参考文献	203

第 5 部分 大功率交流传动系统

第 12 章 电压源型逆变器传动系统	207
12.1 简介	207
12.2 基于两电平 VSI 的中压传动系统	207
12.2.1 功率变换模块	207
12.2.2 带不控前端的两电平 VSI 传动系统	208
12.3 中点箝位式逆变器传动系统	210
12.3.1 基于 GCT 的 NPC 逆变器传动系统	210
12.3.2 基于 IGBT 的 NPC 逆变器传动系统	213
12.4 多电平串联 H 桥逆变器传动系统	214
12.4.1 适用于 2300V/4160V 电动机的 CHB 逆变器传动系统	214
12.4.2 适用于 6.6kV/11.8kV 电动机的 CHB 逆变器传动系统	216
12.5 NPC/H 桥逆变器传动系统	217
12.6 小结	218
参考文献	218
第 13 章 电流源型变频器传动系统	220
13.1 简介	220
13.2 采用 PWM 整流器的电流源型变频器传动系统	220
13.2.1 采用单桥 PWM 整流器的电流源型变频器传动系统	220
13.2.2 专用电动机的电流源型变频器传动系统	224
13.2.3 采用双桥 PWM 整流器的电流源型变频器传动系统	225
13.3 适用于常规变流电动机的无变压器电流源型逆变器传动系统	225
13.3.1 新型电流源型变频器的拓扑结构	226
13.3.2 用于抑制共模电压的一体化直流电抗器	226
13.4 采用多脉波 SCR 整流器的电流源型变频器传动系统	229

XII 大功率变频器及交流传动

13.4.1 采用 18 脉波 SCR 整流器的电流源型变频器传动系统	229
13.4.2 采用 6 脉波 SCR 整流器的低成本电流源型变频器传动系统	229
13.5 同步电动机的负载换相逆变器传动系统	230
13.5.1 12 脉波输入和 6 脉波输出的 LCI 传动系统	230
13.5.2 12 脉波输入和 12 脉波输出的 LCI 传动系统	231
13.6 小结	231
参考文献	232
第 14 章 高性能传动控制方法	233
14.1 简介	233
14.2 坐标变换	233
14.2.1 abc/dq 坐标变换	233
14.2.2 3/2 静止变换	235
14.3 异步电动机数学模型	236
14.3.1 空间矢量电动机模型	236
14.3.2 dq 电动机模型	238
14.3.3 异步电动机暂态特性	238
14.4 磁场定向控制原理	242
14.4.1 磁场定向	242
14.4.2 FOC 的控制框图	243
14.5 直接磁场定向控制	244
14.5.1 系统框图	244
14.5.2 转子磁链计算	245
14.5.3 电流控制 VSI 变频器的直接 FOC	247
14.6 间接磁场定向控制	250
14.7 电流源型逆变器传动系统的磁场定向控制	252
14.8 直接转矩控制	254
14.8.1 直接转矩控制的原理	255
14.8.2 开关逻辑	255
14.8.3 定子磁链和转矩计算	259
14.8.4 DTC 传动系统仿真	259
14.8.5 DTC 和 FOC 方法之间的比较	261
14.9 小结	261
参考文献	262
附录	263
附录 A 缩略语中英文对照表	263
附录 B 教学作业	265
B.1 简介	265
B.2 教学作业示例——教学作业 3：两电平 VSI 的空间矢量调制方法	265
B.3 教学作业答案	267

第 1 部分 绪 论

第1章 概述

1.1 简介

20 世纪 80 年代中期, 4500V 门极关断 (Gate Turn Off, GTO) 晶闸管的商业化生产, 促进了中压大功率变频器以及传动行业的发展^[1]。GTO 晶闸管[⊖]在很长一段时间内都是中压传动所采用的标准功率器件。直到 90 年代后期, 才出现了大功率绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 和门极换向晶闸管 (Gate Commutated Thyristor, GCT)^[2,3]。这些开关器件具有优越的开关特性、较小的功率损耗、简单的门 (栅) 极控制, 且无需复杂的吸收电路等特性。在大功率电力电子的主要应用场合已经得到了快速的推广和应用。

一般来讲, 中压传动大体覆盖了 0.4 ~ 40MW 的功率等级, 电压等级为 2.3 ~ 13.8kV。但其功率范围最大可延伸至 100MW, 在这个功率等级多数使用负载换相逆变器同步电动机传动系统^[4]。据统计, 已安装的中压传动系统主要集中在 1 ~ 4MW、3.3 ~ 6.6kV 的等级范围之内, 如图 1-1 所示。

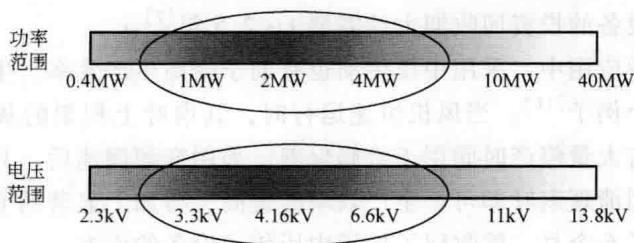


图 1-1 中压传动系统的电压和功率范围

(来源: Rockwell Automation 公司)

中压大功率传动系统已在工业生产中得到了广泛应用, 例如石化行业中的管道泵^[5]、水泥行业中的风机^[6]、水泵站的供水泵^[7]、运输行业中的牵引机械^[8]以及冶金行业中的轧机^[9]等。参考文献 [10, 11] 还给出了其他行业的一些应用情况。本章的附录总结了中压传动系统的主要应用场合^[12]。

⊖ 门极关断 (Gate Turn Off, GTO) 晶闸管应简称为 GTO 晶闸管, 但为书写方便, 人们往往习惯用“GTO”代表门极关断晶闸管。——编辑注

自 21 世纪以来,世界范围内已有几千套中压传动系统交付使用。市场调查显示,大约有 85% 的中压传动系统用于泵、风机、压缩机和传送带等负载^[13],这些应用场合的传动系统不需要很高的动态性能。在所有已安装的中压传动系统中,只有大约 15% 为非标准传动系统,如图 1-2 所示。

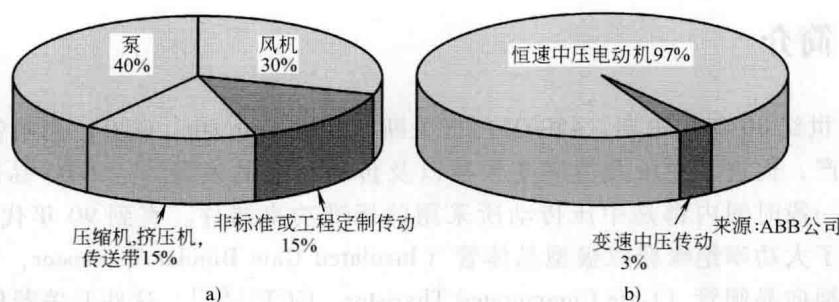


图 1-2 中压传动市场概况

a) 中压传动的负载类型 b) 中压传动与中压电动机的对比

旧设备的改造是中压传动系统应用的一个主要市场。市场调查显示,在现已安装的所有中压电动机中,约有 97% 处于恒速运行状态,只有约 3% 采用了变速传动系统^[13]。拖动风机或泵类负载的电动机恒速运行时,空气或液体流量经常采用节流控制、挡板、流量控制阀门等传统的机械手段来调节,造成了巨大的能源浪费。在这种情况下,采用中压传动系统会带来很好的节能效果。据统计,中压传动设备的投资回收期大约需要 1~2.5 年^[7]。

在一些行业应用中,采用中压传动也有助于提高生产效率。生产水泥所用的鼓风机就是一个例子^[11]。当风机恒速运行时,其扇叶上积累的灰尘必须经常清理,因此每年有大量停产时间用于维修保养。采用变频调速后,只需在每年一次的生产间隔期间清理扇叶即可。生产效率的提高,再加上显著的节能效果,使得上述案例只用了 6 个月,就收回了投资中压传动设备的成本。

图 1-3 给出了中压传动系统的总体框图。其中,根据系统需求以及所采用整流器的种类,网侧和电动机侧滤波器是可选的。另外,为了降低网侧电流畸变,经常采用多个二次绕组的移相变压器。

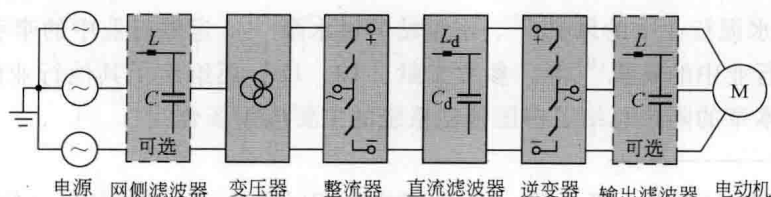


图 1-3 中压传动系统的总体框图