

高等学校电气工程与自动化专业教材

交流调速控制系统

李华德 主编

白晶 李志民 李擎 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电气工程与自动化专业教材

交流调速控制系统

李华德 主编

白晶 李志民 李擎 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面、系统、深入地阐述了现代交流电动机调速系统的基本控制原理、系统组成和结构特点、分析和设计方法。

本书第1章介绍了交流调速技术的发展和现状、系统分类方法、发展趋势及动向;第2章讲述了基于静态控制方式的异步电动机变频调速系统及其设计方法;第3章讲述了异步电动机数学模型、矢量坐标变换、矢量控制系统构成及设计方法;第4章讲述了异步电动机直接转矩控制系统的基本理论和基本组成;第5章讲述了同步电动机调速系统的结构和工作原理;第6章介绍了双馈及串级调速系统;第7章介绍了交流电动机晶闸管调压调速系统。

本书可供高等院校工业自动化专业本科生、研究生作为教材或参考书使用,也可供科研院所、厂矿企业从事电气传动的科技工作者参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速控制系统/李华德主编. —北京:电子工业出版社,2003.3

高等学校电气工程与自动化专业教材

ISBN 7-5053-8558-5

I. 交... II. 李... III. 交流电机—调速—控制系统—高等学校—教材 IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 012397 号

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:24.5 字数:588 千字

版 次:2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:32.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

现代交流调速技术是 20 世纪后期人类社会的重大技术进步之一,其发展速度之快、应用覆盖面之广都是前所未有的。应用实践表明,采用现代交流调速技术极大地提高了传动系统的运行质量,带来了巨大的经济和社会效益。进入 21 世纪,交流调速技术继续向纵深方向发展,仍是科学技术发展中的热点课题,方兴未艾。本书正是在这样的时代背景下,面向 21 世纪,适应交流调速新发展的需要而编写的。

现代交流调速系统是电机学、电力电子学、微电子学、计算机科学、自动控制理论等多种学科的有机结合和交叉应用。但是同其他任何自动控制系统一样,其根本的理论基础是自动控制理论,也就是说交流调速控制系统是根据某种控制方式、控制方法建立起来的。因此,本书的编写立足于对控制系统的分析和设计,即全面、系统、深入地讨论现代交流调速系统的控制原理、控制结构及设计方法。为此,在编写体系上是根据交流电动机的控制方式安排章节顺序,并在适当的章节介绍一些交流调速的新成果。

本书题材来源实际,具有前沿性和先进性。遵循了深入浅出,循序渐进写作路线及理论联系实际的原则。书中所涉及到的公式、方程式及数学表达式都进行了严格的推导证明,力争准确无误。为了防止体系上的混乱和篇幅的膨胀,本书编写过程以控制理论、控制方法为主线贯穿始终,很少涉及具体电路,凡有专门著作或教材(如电力电子技术,计算机控制技术等)已论述过的,本书都不专门列入。

本书重点内容是介绍和论述现代交流电动机变频调速系统,即以第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章作为本书的重点。考虑到工业生产中不少场合使用绕线式异步电动机,为此在第 6 章介绍了双馈及串级调速系统。由于鼠笼式异步电动机晶闸管调压调速系统还有应用,特别是在软启动方面的应用很普遍,为此本书安排了第 7 章异步电动机晶闸管调压调速系统。

本书第 2 章由北京科技大学博士研究生、教授白晶编写。第 4 章、第 6 章由北京科技大学李擎副教授编写。第 5 章由北京科技大学博士研究生、教授李志民编写。第 7 章由北京科技大学博士研究生尚德舜编写。北京科技大学孟文博副教授参加了第 2 章部分内容的编写,北京钢铁设计总院高级工程师王云波参加了第 4 章的编写。第 1 章、第 3 章由北京科技大学李华德教授编写。李华德、白晶共同负责全书的统一规划、审查、删改和补充。北京科技大学硕士研究生李健、李光参加了本书的整理、录入及编辑工作。

本书可供高等院校工业自动化专业本科生、研究生作为教材或参考书使用,也可供科研院所、厂矿企业从事电气传动的科技工作者参考使用。

由于本书作者学识水平有限,在编写过程中难免出现缺点、错误及不当之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

作者

2002 年 8 月

常用符号表

一、元件和装置用的文字符号(按国家标准 GB7159—87)

ACR	电流调节器	K	继电器;接触器
ADR	电流变化率调节器	KF	正向继电器
AE	电动势运算器	KMF	正向接触器
AER	电动势调节器	KMR	反向接触器
AFR	励磁电流调节器	FR	反向继电器
AP	脉冲放大器	L	电感;电抗器
APR	功率调节器	LS	饱和电抗器
AR	反号器	IM	异步电动机
ASR	转速调节器	DM	直流电动机
ATR	转矩调节器	SM	同步电动机
AUR	电压调节器	TM	力矩电动机
A Ψ R	磁链调节器	N	运算放大器
B	非电量—电量变换器	R,r	电阻,电阻器;变阻器
BQ	位置变换器	RP	电位器
BRT	转速传感器	SA	控制开关;选择开关
C	电容	SB	按钮开关
CD	电流微分环节	T	变压器
D	数字集成电路和器件	TA	电流互感器
DHC	滞环比较器	TAFC	励磁电流互感器
DLC	逻辑控制器	TC	控制电源变压器
DLD	逻辑延时环节	TG	测速发电机
F	励磁绕组	TI	逆变变压器
FB	反馈环节	TM	电力变压器;整流变压器
FBS	测速反馈环节	TU	自耦变压器
G	发电机;振荡器;发生器	TV	电压互感器
GAB	绝对值变换器	U	变换器;调制器
GF	函数发生器	UI	逆变器
GT	触发装置	UR	整流器
GI	给定积分器	V	开关器件;晶闸管

VD	二极管	VFC	励磁电流可控整流装置
VT	晶体管,晶闸管	VR	反组晶闸管整流装置
VF	正组晶闸管整流装置		

二、常用缩写符号

CSI	电流源(型)逆变器(Current Source Inverter)
CVCF	恒压恒频(Constant Voltage Constant Frequency)
PWM	脉宽调制(Pulse Width Modulation)
SCR	晶闸管(Silicon Controlled Rectifier)
SPWM	正弦波脉宽调制(Sinusoidal PWM)
VCO	压控振荡器(Voltage-Controlled Oscillator)
VR	矢量旋转变换器(Vector Rotator)
VSI	电压源(型)逆变器(Voltage Source Inverter)
VVVF	变压变频(Variable Voltage Variable Frequency)

三、参数和物理量文字符号

A	面积
B	磁感应强度
C	电容;输出被控变量
D	调速范围;摩擦转矩阻尼系数;脉冲数
E, e	反电动势,感应电动势(大写为平均值或有效值,小写为瞬时值,下同);误差
F	磁动势;力
f	频率
G	重力
g	重力加速度
GD^2	飞轮惯量
I, i	电流
i	减速比
I_d, i_d	整流电流
I_f	励磁电流
J	转动惯量
K	控制系统各环节的放大系数(以环节符号为下角标);闭环系统的开环放大系数
K_g	减速器放大系数

L	电感
l	长度
L_{σ}	漏感
L_m	互感
M	电动机; 力矩
N	匝数; 扰动量; 载波比; 额定值
n	转速; n 次谐波
n_s	理想空载转速; 同步转速
n_p	极对数
P	功率, 有功功率
$p \left(= \frac{d}{dt} \right)$	微分算子
P_m	电磁功率
P_s	转差功率
Q	无功功率
R	电阻
R_s	直流电机电枢电阻
R_{rec}	整流装置内阻
S	视在功率
s	转差率; 静差率
T	时间常数; 开关周期; 感应同步器绕组节距
t	时间
T_e	电磁转矩
T_{ei}	异步电动机电磁转矩
T_{eq}	同步电动机电磁转矩
T_L	负载转矩
T_m	机电时间常数
T_o	滤波时间常数
t_{off}	关断时间
t_s	调节时间
U, u	电压
U_b	基极驱动电压
U_{ct}	触发装置控制电压
U_d, u_d	整流电压
U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压

U_f, u_f	励磁电压
U_x	变量 x 的反馈电压(x 可用变量符号代替)
U_x^*	变量 x 的给定电压(x 可用变量符号代替)
V	体积
v	速度,线速度
$W(p)$	传递函数,开环传递函数
$W_{cl}(p)$	闭环传递函数
$W_{obj}(p)$	控制对象传递函数
W_m	磁场储能
X	电抗
x	机械位移
Z	阻抗;电抗器
z	负载系数
α	速度反馈系数;可控整流器的控制角
β	电流反馈系数;可控整流器的逆变角
γ	电压反馈系数;相角裕度;(同步电动机反电势换流时的)换流提前角
γ_0	空载换流提前角
δ	转速微分时间常数相对值;磁链反馈系数;脉冲宽度;换流剩余角
Δn	转速降落
ΔU	偏差电压
$\Delta \theta$	失调角,角差
ξ	阻尼比
η	效率
θ	电角位移;可控整流器的导通角
θ_m	机械角位移
λ	电机允许过载倍数
μ	磁导率;换流重叠角
ρ	占空比;电位器的分压系数
σ	漏磁系数
$\sigma\%$	超调量
τ	时间常数,积分时间常数
Φ	磁通
φ	相位角、阻抗角;功率因数角
Ψ	磁链
Ω	机械角速度

ω	角速度,角频率
ω_b	闭环特性通频带
ω_c	开环特性截止频率
ω_n	二阶系统的自然振荡频率
$\Delta\omega$	转差角速度

四、常用下角标

m	极限值,峰值;励磁 (magnetizing)
max	最大值(maximum)
min	最小值(minimum)
N, nom	额定值,标称值(nominal)
off	断开(off)
on	闭合(on)
r	转子(rotor);上升(rise);反向(reverse)
s	定子(stator);电源(source)
∞	稳态值,无穷大
A,B,C	定子三相
a,b,c	转子三相
cr	临界(critical)
av	平均值(average)
c	环流(circulating current);控制(control)
com	比较(compare);复合(combination)
k	短路
L	负载(Load)
op	开环(open loop)
syn	同步(synchronous)

计量单位 国际单位制(SI)

物理量名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤),吨	kg ,t
时间	秒,分,小时	s, min, h
电流	安[培]	A
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr
频率	赫[兹]	Hz
力、重力	牛[顿]	N
压力、压强、应力	帕[斯卡]	Pa
电能[量]、能[量]、功、热量	焦耳	J
功率	瓦[特]	W
电荷[量]	库[仑]	C
电压、电位、电动势	伏[特]	V
电容	法[拉]	F
电阻、阻抗、电抗	欧[姆]	Ω
电阻率	欧[姆]米	$\Omega \cdot m$
电导	西[门子]	S
电导率	西[门子]每米	S/m
磁通[量]	韦[伯]	Wb
磁通密度、磁感应强度	特[斯拉]	T
电感	亨[利]	H
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$
旋转速度	转/分	r/min
电场强度	伏[特]/米	V/m
磁场强度	安[培]/米	A/m
电流强度	安[培]每平方米	A/m ²
磁导	亨[利]	H
磁导率	亨[利]/米	H/m
磁阻	每亨利	H ⁻¹
力矩	牛[顿]米	N·m
转动惯量	千克二次方米	kg·m ²
相[位]差、相[位]移	弧度	rad

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 交流电动机调速技术的发展和现状	1
1.2 现代交流调速系统的类型	6
1.2.1 同步电动机调速系统的基本类型	7
1.2.2 异步电动机调速系统的基本类型	8
1.3 现代交流调速系统今后的发展趋势和动向	8
第 2 章 基于静态模型的异步电动机变频调速系统	13
2.1 基于静态模型的异步电动机变频调速系统控制原理及其机械特性	13
2.1.1 电压与频率之比为常数的控制方式	14
2.1.2 转差频率控制方式	19
2.2 交流调速的脉宽调制(PWM)控制技术	23
2.2.1 电压正弦 PWM 法	23
2.2.2 PWM 模式的优化	40
2.2.3 电压空间矢量 PWM 技术——磁链轨迹法	47
2.2.4 PWM 技术性能指标	55
2.3 恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统	57
2.3.1 变频器(变频调速装置)	57
2.3.2 电压源型频率开环的异步电动机变压变频调速系统	60
2.3.3 电流源型频率开环的异步电动机变压变频调速系统	61
2.4 异步电动机转差频率控制的变频调速系统	65
2.4.1 电流源型异步电动机转差频率控制的变频调速系统构成及工作原理	68
2.4.2 转差频率控制的变频调速系统数学模型	68
2.5 电流正弦 PWM 控制的异步电动机变频调速系统	71
2.6 电压源型 IGBT—SPWM 异步电动机变压变频调速系统数字化设计	74
2.6.1 系统构成	74
2.6.2 电压源型 IGBT—PWM 异步电动机变压变频调速系统软件设计	85
第 3 章 异步电动机矢量控制系统	92
3.1 矢量控制的基本概念	93
3.1.1 直流电动机和异步电动机的电磁转矩	93
3.1.2 矢量控制的基本思路	96
3.2 矢量坐标变换及变换矩阵	99
3.2.1 异步电动机坐标系与空间矢量	99
3.2.2 矢量坐标变换原理及实现方法	101
3.3 三相异步电动机在不同坐标系上的数学模型	112

3.3.1	三相异步电动机在三相静止坐标系上的数学模型	113
3.3.2	三相异步电动机在二相静止坐标系上的数学模型	119
3.3.3	三相异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	125
3.4	磁场定向和矢量控制的基本控制结构	126
3.4.1	按转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统	127
3.4.2	异步电动机其他两种磁场定向方法	131
3.5	转子磁链观测器	132
3.5.1	建立在二相静止坐标系(α, β)上的开环转子磁链观测器	133
3.5.2	闭环方式转子磁链观测器	135
3.6	异步电动机矢量控制系统	139
3.6.1	带转矩内环的转速、磁链闭环异步电动机矢量控制系统	139
3.6.2	转差型异步电动机矢量控制系统	140
3.6.3	具有参数自校正的转差型矢量控制系统	142
3.6.4	无速度传感器的矢量控制系统	145
3.7	数字化异步电动机矢量控制系统设计	147
3.7.1	以 DSP 为控制核心的数字异步电动机矢量控制系统的硬件组成	147
3.7.2	软件设计(运算程序和控制算法)	150
第 4 章	异步电动机直接转矩控制变频调速系统	166
4.1	概述	166
4.1.1	直接转矩控制技术的诞生与发展	166
4.1.2	直接转矩控制系统的特点	167
4.2	异步电动机直接转矩控制系统的理论基础	168
4.2.1	直接转矩控制(DTC)的基本思想	168
4.2.2	异步电动机定子轴系的数学模型	169
4.2.3	逆变器的八种开关状态和逆变器的电压状态	174
4.2.4	电压空间矢量的概念	177
4.2.5	电压空间矢量与磁链空间矢量的关系	179
4.2.6	电压空间矢量对电动机转矩的影响	180
4.2.7	电压空间矢量的正确选择	181
4.2.8	异步电动机直接转矩控制的基本结构	184
4.3	异步电动机直接转矩控制(DTC)系统的基本组成及工作原理	188
4.3.1	磁链自控制	189
4.3.2	转矩调节	196
4.3.3	磁链调节	203
4.3.4	电压状态的选择	206
4.3.5	最小开关持续时间	211
4.3.6	逆变器的开关频率调节	214
4.4	在低速范围内直接转矩控制系统的转矩控制与调节方法	216
4.4.1	在低速范围内直接转矩控制系统的结构特点	216

4.4.2	区段的电压状态选择	218
4.4.3	低速范围内转矩与磁链调节的协调	221
4.4.4	使用 -120° 电压的磁链调节	223
4.5	在弱磁范围内直接转矩控制系统的转矩控制及恒功率调节	224
4.5.1	弱磁范围内直接转矩控制系统的结构特点	224
4.5.2	弱磁范围内的转矩控制与调节	224
4.5.3	弱磁范围内的功率调节	226
第 5 章	同步电动机调速系统	230
5.1	同步电动机调速的基本原理	230
5.1.1	同步电动机的基本结构	230
5.1.2	同步电动机的调速原理	231
5.1.3	自控式同步电动机变频调速原理	232
5.2	永磁同步电动机调速控制系统	236
5.2.1	永磁同步电动机的调速原理	237
5.2.2	正弦波永磁同步电动机控制系统的构成和运行	240
5.3	无刷直流电动机调速系统	243
5.3.1	无刷直流电动机的调速原理	243
5.3.2	无刷直流电动机的数学模型	245
5.3.3	无刷直流机调速系统	246
5.4	负载换向的同步电动机控制系统	249
5.4.1	负载换向同步电动机的基本工作原理	250
5.4.2	负载换向同步电动机的换流方法	255
5.4.3	负载换向同步电动机的运行特点	259
5.4.4	负载换向同步电动机调速系统	266
5.4.5	负载换向同步电动机的应用实例	271
5.5	气隙磁场定向的同步电动机矢量控制调速系统	278
5.5.1	同步电动机气隙磁场定向控制的原理	278
5.5.2	三相交-交变频器的电流控制	282
5.5.3	同步电动机矢量控制系统中的电流、电压模型	287
5.5.4	同步电动机的磁链控制	292
5.5.5	同步电动机的功率因数控制	294
5.5.6	采用增量式光电码盘检测转子位置的方法	296
5.5.7	同步电动机矢量控制系统的构成和四象限运行	300
第 6 章	绕线式异步电动机的串级调速和双馈调速系统	305
6.1	串级调速和双馈调速的基本原理	305
6.1.1	绕线式异步电动机双馈调速的基本工作原理	305
6.1.2	绕线式异步电动机串级调速的基本工作原理	314
6.2	双馈调速系统和串级调速系统的稳态特性	317
6.2.1	双馈调速系统的稳态特性	317

6.2.2	调速系统的稳态特性	323
6.3	双馈调速和串级调速的闭环控制系统	340
6.3.1	双馈调速的简单闭环控制系统	341
6.3.2	串级调速的闭环控制系统	342
6.4	双馈调速系统和串级调速系统的其他形式	345
6.4.1	双馈调速系统的其他形式	346
6.4.2	超同步串级调速系统	348
6.5	绕线式异步电动机串级调速系统和双馈调速系统的设计	351
6.5.1	电动机及变流器的容量选择特点	351
6.5.2	主电路设计	352
6.5.3	起动装置的选择	355
6.6	绕线式异步电动机双馈矢量控制系统	357
6.6.1	双馈电机矢量控制原理	358
6.6.2	双馈电机的数学模型	359
6.6.3	气隙磁链观测器	360
6.6.4	转子电流的转矩分量和励磁分量设定与控制	361
6.6.5	转子电流闭环控制及转子电压的前馈补偿环节	362
6.6.6	双馈电机矢量控制的其他方案	363
第7章	异步电动机晶闸管调压调速系统	366
7.1	异步电动机晶闸管调压调速系统工作原理	366
7.2	异步电动机调压调速时的机械特性	367
7.3	异步电动机调压调速的功率损耗	368
7.4	闭环控制的异步电动机调压调速系统	370
7.4.1	闭环控制的异步电动机调压调速系统静态分析	371
7.4.2	闭环控制的异步电动机调压调速系统动态分析	372
7.5	交流电动机晶闸管软起动器	374

第1章 绪 论

1.1 交流电动机调速技术的发展和现状

在用电系统中,电动机作为主要的动力设备而广泛地应用于工农业生产、国防、科技及社会生活等各个方面。电动机负荷约占总发电量的 60%~70%,成为用电量最多的电气设备。

根据采用的电流制式不同,电动机分为直流电动机和交流电动机两大类,其中交流电动机拥有量最多,提供给工业生产的电量多半是通过交流电动机加以利用的。交流电动机的诞生和发展已有一百多年的历史,至今已经研究、制造了形式多样、用途各异的各种容量、各种品种的交流电动机。交流电动机分为同步电动机和异步(感应)电动机两大类。电动机的转子转速与定子电流的频率保持严格不变的关系,即是同步电动机;反之,若不保持这种关系,即是异步电动机。据统计,交流电动机用电量占电机总用电量的 85%左右,可见交流电动机应用的广泛性及其在国民经济中的重要地位。

电动机作为把电能转换为机械能的主要设备,在实际应用中,一是要使电动机具有较高的机电能量转换效率;二是根据生产机械的工艺要求控制和调节电动机的旋转速度。电动机的调速性能如何对提高产品质量、提高劳动生产率和节省电能有着直接的决定性影响。为了控制电动机的运行,就要为电动机配上控制装置。电动机+控制装置=电力传动自动控制系统。以直流电动机作为控制对象的电力传动自动控制系统称之为直流调速系统;以交流电动机作为控制对象的电力传动自动控制系统称之为交流调速系统。根据交流电机的分类,相应地有同步电动机调速系统和异步电动机调速系统。

众所周知,直流电动机的转速容易控制和调节,在额定转速以下,保持励磁电流恒定,可用改变电枢电压的方法实现恒转矩调速;在额定转速以上,保持电枢电压恒定,可用改变励磁的方法实现恒功率调速。采用转速、电流双闭环直流调速系统可获得优良的静、动态调速特性。因此,长期以来(20世纪80年代以前)在变速传动领域中,直流调速一直占据主导地位。但是,由于直流电动机本身结构上存在机械式换向器和电刷这一致命弱点,这给直流调速系统的开发和应用带来了一系列限制,即:

① 机械式换向器表面线速度及换向电流、电压有一极限容许值,这就限制了单机的转速和功率。如果要超过极限容许值,则大大增加电机制造的难度和成本,以及调速系统的复杂性。因此,在工业生产中,对一些要求特高转速、特大功率的场合则根本无法采用直流调速方案。

② 为了使机械式换向器能够可靠工作,往往增大电枢和换向器直径,导致电机转动惯量

很大。对于要求快速响应的生产工艺,采用直流调速方式难以实现。

③ 机械式换向器必须经常检查和维修,电刷必须定期更换。这就表明了直流调速系统维护工作量大,维修费用高,同时停机检修和更换电刷也直接影响了正常生产。

④ 在一些易燃、易爆的生产场合,一些多粉尘、多腐蚀性气体的生产场合不能或不宜使用直流电动机。

由于直流电动机在应用中存在着这样的一些限制,使得直流调速系统的应用也相应受到了限制。然而,采用无换向器的交流电动机作为调速传动设备代替直流调速传动可以突破这些限制,满足生产发展对调速传动的各种不同的要求。

交流电动机,特别是鼠笼型异步电动机,具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、很少维修、使用环境及结构发展不受限制等优点。但是长期以来由于受科技发展的限制,把交流电动机作为调速电机的困难问题未能得到较好的解决,只有一些调速性能差、低效耗能的调速方法,如:

① 绕线式异步电动机转子外串电阻及机组式串级调速方法。

② 鼠笼式异步电动机定子调压调速方法(自耦变压器、饱和电抗器)及后来的电磁(滑差离合器)调速方法。

20 世纪 60 年代以后,由于生产发展的需要和节省电能的要求,促使世界各国重视交流调速技术的研究与开发。尤其是 20 世纪 70 年代以后,由于科学技术的迅速发展为交流调速的发展创造了极为有利的技术条件和物质基础。从此,交流调速理论及应用技术大致沿下述四个方面发展。

1. 电力电子器件的蓬勃发展和迅速换代促进了变流技术的迅速发展和变流装置的现代化

电力电子器件是现代交流调速装置的支柱,其发展直接决定和影响交流调速的发展。电力电子器件发展情况如图 1-1 所示。

20 世纪 80 年代中期以前,变频装置功率回路主要采用晶闸管元件。装置的效率、可靠性、成本、体积均无法与同容量的直流调速装置相比。80 年代中期以后用第二代电力电子器件 GTR(Giant Transistor)、GTO(Gate Turn Off thyristor)、VDMOS-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等制造的变频装置在性能与价格比上可以与直流调速装置相媲美。随着向大电流、高电压、高频化、集成化、模块化方向继续发展,第三代电力电子器件是 20 世纪 90 年代制造变频器的主流产品,中、小功率的变频调速装置(1~1000kW)主要是采用 IGBT,中、大功率的变频调速装置(1000~10000kW)采用 GTO 器件。20 世纪 90 年代末至今,电力电子器件的发展进入了第四代。主要实用的第四代器件为:

(1) 高压 IGBT 器件(SIEMENS 公司 HVIGBT)

沟槽式结构的绝缘栅晶体管 IGBT 问世,使 IGBT 器件的耐压水平由常规 1200V 提高到 3300V。表明 IGBT 器件突破了耐压限制,进入第四代高压 IGBT 阶段,相应三电平 IGBT 中

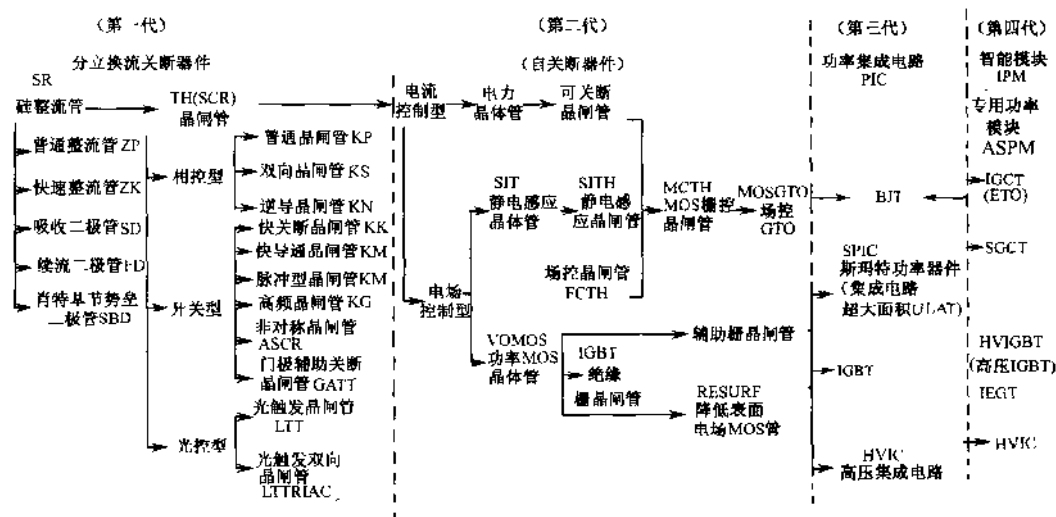


图 1-1 电力半导体发展态势

压(2300~4160V)大容量变频装置进入实用化阶段。目前采用 IGBT 器件的变频器容量达到 6000kVA,输出电压等级达到 4160V。

(2) IGCT(Insulated Gate Controlled Transistor)器件

这个时期,ABB 公司把环形门极 GTO 器件配以外加 MOSFET 功能,研制成功全控型 IGCT(ETO)器件,使其耐压及容量保持了 GTO 的水平,门极控制功率大大减少,仅为 0.5~1W。目前实用化的 IGCT 变频器容量 6000~10000kVA,输出电压等级达到 3300~6000V。

(3) IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)器件

东芝、GE 公司研制的高压、大容量、全控型功率器件 IEGT 是把 IGBT 器件和 GTO 器件二者优点结合起来的注入增强栅晶闸管。IEGT 器件也开始进入实用化阶段。

(4) SGCT(Symmetrical Gate Commutated Thyristor)器件

罗克威尔公司研制的高压、大容量、全控型功率器件 SGCT 也开始走向实用化阶段。

由于 GTR、GTO 器件本身存在的不可克服的缺陷,功率器件进入第三代以来,GTR 器件已被淘汰不再使用。进入第四代后,GTO 器件也将被逐步淘汰。

第四代电力电子器件模块化更为成熟。如:智能化模块 IPM、专用功率器件模块 ASPM 等。模块化功率器件将是 21 世纪主宰器件。

需要指出的是,以上所述的全控型开关功率器件主要应用于异步电动机变频调速系统中,其原因众所周知。但是目前同步电动机变频调速系统中仍采用晶闸管,其原因也是众所周知的。一代电力电子器件带来一代变频调速装置,性能/价格比一代高过一代。在人类社会进入