

CAVD'89

Proceedings  
of the  
1<sup>st</sup> Chinese Academic Conference  
on  
Variable Speed AC Drives

中国 交流电机 学术会议  
调速传动

# 论文集

第一届

中国·北戴河

Aug · 1989

Beidaihe China

CAVD'89

第一届中国交流电机  
调速传动学术会议

论文集

中国自动化学会电气自动化委员会

中国电工技术学会电控系统与装置委员会

中国铁道学会铁道自动化委员会

中国造船工程学会船舶轮机学术委员会

中国金属学会冶金自动化学会

中国电工技术学会电力电子学会

机械电子工业部电气自动化情报网

1989.8

北戴河

责任编辑 禹鹏举

封面设计 董骏声

# C A V D ' 8 9

第一届中国交流电机调速传动学术会议论文集

---

编辑出版：CAA—11秘书处

印 刷：天津电传所服务公司印刷厂

字 数：100万 印数：1 ~ 1000

---

# 第一届中国交流电机调速传动学术会议

## 举 办 单 位

中国自动化学会电气自动化委员会      中国电工技术学会电控系统与装置委员会  
中国铁道学会铁道自动化委员会      中国造船工程学会船舶轮机学术委员会  
中国金属学会冶金自动化学会      中国电工技术学会电力电子学会  
机械电子工业部电气自动化情报网

## 大 会 执 行 主 席

杨竞衡 喻士林 陈伯时 王兴亚 许广锡

## 学 术 委 员 会

主任委员: 陈伯时

副主任委员: 王兴亚 刘宗富 许广锡 陈敏逊

委 员: 王广大 王立文 叶澄中 吕家元 邵丙衡 陈 坚 李鹤轩  
张铁忠 周胜宗 陆祥润 夏新顺 黄 俊 顾旭庭 熊长福

## 组 织 委 员 会

秘 书 长: 禹鹏举      副秘书长: 朱雅清 陈报生

委 员: 陈守良 张顺昌 张振华 耿树彬

## 主 办 单 位

中国自动化学会电气自动化专业委员会

## 赞 助 单 位

北京整流器厂      天津电气传动设计研究所

---

中国交流电机调速传动学术会议联络处设在中国自动化学会电气自动化委员会秘书处内  
通信地址: 天津电气传动设计研究所转, 邮政编码: 300180, 电话: 491101, 电挂: 4797

# 前 言

从五十年代末期开始,电气传动自动化控制学术领域中开始进行着一场重大的技术改革,一向垄断高性能调速领域的直流电机调速传动遇到交流电机调速传动的有力挑战。

随着矢量控制、脉宽调制、大功率自关断电力电子器件的制造、以微处理机为核心的全数字控制等关键技术的突破,结构简单的交流电机调速传动系统取代结构复杂的直流电机调速传动系统已为期不远,电气传动交流化的时代即将来临。当今,信息技术的发展,必将促使电力、微电子、信息与控制三个领域逐步走向融合。交流电机调速传动技术的开发、应用,将完善“信息—物质”接口,这一趋势将会带动第三次工业革命。

目前,我国交流电机调速传动的水平与国外先进水平的差距大约为15—20年。而且由于力量分散,力不从心,低水平的重复工作,发展缓慢,这与日新月异的科技进步以及国内实际需要是不相适应的。因此,从事交流电机调速传动技术的研究、开发、推广和普及,将是电气传动自动化控制技术领域的主战场。

自1987年12位教授为建议加速开发交流电机调速传动技术致函李鹏总理以来,机械电子工业部制定了交流电机调速传动的发展规划,国家科委开设了电力电子发展战略研究的软课题……。可见交流电机调速传动技术的发展已经得到了中央领导和国家有关部委的重视,业已列入国家重点扶植的高技术之一,这是事业发展的可靠保证。当务之急是如何发挥现有的人力、物力的作用,统一领导、统一规划、集中力量、联合攻关,以尽快的速度赶上世界先进水平。

根据学会的性质,组织多层次的活动,开展横向联合以配合国家机关的工作,弥补行政手段所不及的范围,克服竞争带来的消极影响,是十分必要的。为此,中国自动化学会电气自动化委员会、中国电工技术学会电控系统与装置委员会、中国铁道学会铁道自动化委员会、中国造船工程学会船舶轮机委员会、中国金属学会冶金自动化学会、中国电工技术学会电力电子学会等六个学术团体和机电部电气自动化情报网联合举办“中国交流电机调速传动学术会议”,每两年召开一次,轮流主办。目的是调动各方面的积极因素,不断地做好交流调速技术的学术交流、推广应用和宣传普及工作。要实现这一良好愿望,是离不开广大从事交流电机调速传动技术的科技工作者大力支持的。我们衷心希望这种跨学会大联合的专题学术会议形式能延续下来,坚持下去,并不断扩大,真正起到交流最新信息,切磋研究难点,共商促进大计的作。

本论文集尽管征集到的论文还不能表现各个领域交流电机调速传动技术发展的全貌,但无疑在很大程度上反映了当前国内交流电机调速传动的动态,检阅了交流电机调速传动业已取得的成果,展现了交流电机调速传动技术的发展前景。

论文集的出版工作,得到了《电气传动》编辑部、《国外电气自动化》编辑部和天津电气传动设计研究所科技处的大力协助,谨致谢意。

1991年第二届学术会议时再见!

CAVD/89会议秘书处

一九八九年八月

# 目 录

## 前 言

## 主 题 报 告

1. 电力电子和电机传动最近的研究与发展方向..... 博 恩(B.K. Bose)( 1 )

## 交流电机调速传动技术发展战略研究及综述

2. 交流电机调速技术的发展和我们的对策..... 杨竞衡( 3 )
3. 关于发展交流调速传动系统的几点意见..... 胡庆生( 12, )
4. 大力促进交流变频调速技术尽快向纵深发展..... 张建平( 18 )
5. 发展交流电动机调速的主要措施及政策建议..... 陈元舫( 22 )
6. 从技术成长规律看我国电气传动的发展战略..... 李现明 刘 政( 25 )
7. 对发展交流调速装置的设想 ..... 黄继鹄( 32 )
8. 发展交流电机调速技术及其产品化的政策、措施及建议..... 郭保良( 38 )
9. 从赴日考察看电力电子的发展动向..... 王正元( 45 )
10. 交流伺服用控制电机的进展..... 谭建成( 48 )
11. 运动控制中的同步电动机..... 刘宗富( 52 )
12. 微特电机与运动控制技术..... 王季秩( 60 )
13. 应用MiCAS控制的GTO交流传动是我国电力、  
内燃机车的发展方向..... 许广锡 陈报生( 69 )
14. 高速直线电机交流调速的开发、应用及其对策..... 李强北( 80 )
15. 近代交流调速在石油工业中的应用及其发展前景..... 韩毓祥( 88 )

## PWM技术及其应用

16. 采用Power—MOSFET的电流追踪型PWM控制  
高速异步电动机调速系统..... 黄立培 松濂贡规( 93 )
17. 经济型脉宽调制变频调速系统..... 陶近贤 於胜利 陈乐柱 程朋胜( 97 )
18. 斩波型PWM变频调速系统..... 朱平平 夏新顺 蒋洪瑞 陈治川( 103 )
19. 新型脉宽调制(PWM)信号发生器..... 王兴亚 吴建国( 109 )
20. 采用INTEL8098和THP4752控制的晶体管逆变器..... 钱利民 李鹤轩( 117 )
21. 电流型逆变器的PWM自动控制..... 穆大才 刘洪斌( 124 )
22. 由大规模集成电路控制的200kVAPWM 晶体管逆变器... 吴郁馥 马建平( 127 )
23. 电流模型跟踪控制PWM变频调速微机系统..... 周希德 李杏春 胡小纲( 133 )
24. 十六位微处理器控制的电压型最优PWM逆变器  
AC—VSD控制系统..... 杨大跃 孙骆生( 142 )

25. 按目标函数调速的交流电机SPWM微机控制系统..... 黄惠君 徐银泉(151)
26. 基于谐波转矩最小化的电流源逆变器—感应电动机系统  
..... 吴 坚 赵家璧 葛竞存 徐乃钢(154)
27. 一种新型数字化PWM逆变器..... 李永东 黄立培 丁永汀 杨秉寿(162)
28. 脉宽调制专用大规模集成电路..... 孙义和 张建人(166)
29. 对逆变器进行脉宽调制的新算法..... 邓泽生(173)
30. 电流源逆变器的最优脉宽调制及其实现..... 陈 登 连级三(177)
31. 微机控制GTR PWM逆变器..... 魏毅立 何敏哉 徐惠良(182)
32. 电压比较跟踪放大(CTA)式变频调速与CTA交流技术  
..... 周谦之 陈治国 瞿树伟 曹培江(188)
33. 一种新型的脉宽调制方法——均值PWM法..... 汤耀林 王学勤(195)
34. 在最优PWM模式控制下变频器的输出特性..... 陈国呈 金东海(204)
35. 应用磁通轨迹控制原理实现异步机变频调速最优控制  
..... 刘安红 侯思奎 帅玉星(207)
36. 计算机控制 $\Delta f$ 闭环的PWM变频调速系统..... 许广锡 陈报生 曲长政(213)

### 转差控制、矢量控制及转矩直接控制系统

37. 异步机直接力矩自控(DTS)的几个问题..... 马小亮 张 辉 吕家元(228)
38. 对转子电阻变化自适应高性能转差矢量控制系统  
..... 吴 坚 赵家璧 葛竞存 徐乃钢(235)
39. 电势定向式矢量变换控制变频调速系统..... 韩焰青 佟纯厚(243)
40. 转矩、磁通直接自调整变频调速系统的数学模型..... 孙泽昌 周国兴 金秋来(247)
41. 关于“D.S.C”变频调速系统中几个问题的探讨..... 周国兴 金秋来(253)
42. 具有强迫电流输入的异步电机矢量控制调速系统..... 唐晓东 严仰光(258)
43. 用于交流电动机矢量变换控制的双CPU微机系统  
..... 吴建时 吴华仁 郭怡清 彭延泰(263)
44. 一个简化的矢量控制异步电机调速系统..... 张声钱(269)
45. CSIM简易矢量控制方案及其单片机实现系统..... 孟功乔 黄 炯(272)
46. 交流电动机极坐标下的控制系统..... 何敏哉 魏毅立(277)
47. 转差频率控制的变频调速..... 何敏哉(282)
48. 具有参数自适应补偿的MCS 51矢量控制系统  
..... 刘子乾 肖本贤 胡子卿 顾绳谷(286)
49. 高性能的异步机滑差频率矢量控制..... 肖本贤 刘子乾 胡子卿 顾绳谷(293)
50. 采用同步旋转电流调节的矢量控制系统..... 高 杰 侯思奎(300)
51. PWM供电的异步电机电压定向矢量控制... 李永东 B.得福奈尔 M.达卫(305)

### 交—交变频、双馈及串级调速系统

52. 逆变器短路控制式串级调速系统..... 毕绍中(313)

53. VVVF—VVVF循环变频器及其单片机控制系统..... 刘圣昌 王立文(318)
54. 绕线式异步电动机双馈调速系统的研究和设计..... 叶家金(325)
55. 正弦型高功率因数GTO串级调速装置..... 李 跃 褚祖同(331)
56. 晶闸管交—交选通多级变频器研制报告..... 孙骆生 徐鸿育 吴慧仙(335)
57. 交流无整流子电动机调速的微机控制系统..... 陈三宝(340)
58. 交交变频器无环流运行电流过零检测方法及其单片机控制系统  
..... 王 良 王立文(347)
59. 单片机控制的模糊串级调速系统  
..... 刘家健 信毓昌 赵殿礼 王维刚 陈宫甫(355)
60. 双馈感应电动机的磁场定向控制..... 李崇坚 王 松 杜 沧 朱春毅(362)
61. 转差功率回馈调速系统的控制策略..... 汪雄海 徐云舫 童福尧(368)

### 变结构控制及伺服系统

62. 16位微控制器控制的交流数字伺服系统..... 陈 冲 王 炎 刘金琪(375)
63. MCS—96单片机在高精度交流伺服系统中的应用  
..... 邱文渊 严仰光 蔡 晓(380)
64. 变结构控制交流伺服系统滑模存在的边界条件..... 张琳君 陈伯时 金祖芬(387)
65. 交流伺服系统的滑模控制新策略..... 魏 桥 赵家璧 刘以凭(393)
66. 时间次最优滑模变结构控制交流伺服系统..... 胡晓光 徐殿国 赵昌颖(399)
67. 交流变频调速的变结构控制系统..... 张昌凡 沈本荫(405)
68. 比例—滑模复合控制交流进给伺服系统..... 陈 梅 苏建徽 胡子卿(411)
69. 微机控制无刷位置伺服系统..... 许镇琳 王 江 杨学浚(417)

### 交流传动系统新结构及新设计方法

70. 异步电动机反馈线性化解耦控制的变频调速系统  
..... 陈伯时 阮 毅 戴述祖 梁庆龙(422)
71. 异步电机暂态电磁转矩的最优控制..... 陈 坚 方宁俐(429)
72. 异步电动机的解耦——自适应控制..... 于德江 张林平(436)
73. 非线性系统的化简、解耦和异步电动机的控制..... 赵祚连(441)
74. 一种基于规则的控制器的异步机变频调速系统中的应用..... 王德勇(450)
75. 三相交流鼠笼式异步电动机单片机模糊调速系统  
..... 王维刚 赵殿礼 信毓昌 刘家健 陈宫甫(454)
76. 换流剩余角恒定的自控式双电枢绕组同步电动机调速系统  
..... 曹立宇 张苏明 刘 可 李发海 朱东起 生 洁(458)
77. 微机SCR全数字化直接相位控制技术及其在交流调速中的应用 ..... 王祥国(463)
78. SRD控制系统的新方案..... 高海宁 冷增祥(467)
79. 开关磁阻电机传动系统主电路分析..... 张 菁 王耀德(473)
80. 交流感应电机的动态模型初探..... 夏晓华(479)

81. 应用逆Nyquist阵列法设计CCIM调速传动系统...张 浩 胡文瑾 陆元章(485)
82. 一种新颖的无刷电动机控制方法.....丁永平 张 琛 陈铁年(491)
83. 今日无刷调速电机系统的设计与应用.....马玉林(496)
84. 一种新型感应电动机调速装置——XK<sub>2</sub>.....徐克祥(499)
85. 新型稀土永磁方波电机调速系统.....朱震莲 严仰光 薛晓明(506)

## 检测、保护及控制单元

86. 瞬时值电流检测的一种方法.....唐卓尧 何耀三 童明儒(514)
87. 两种用于交流传动系统的电流检测器.....唐晓东(517)
88. 用于机电系统的霍尔电流传感器  
.....郑一阳 卫 薇 刘增敏 王玉富 张进昌 于凤来 吴赛娟(522)
89. 单片机8031在中频电源中的应用.....胡育文(527)
90. 新型GTO—SCR微机控制逆变器研究.....申怀仁 陈 非(531)
91. 五种三相可变频可变幅正弦波发生器的研究.....林 琪(541)
92. 功率晶体管基极驱动优化.....丁学文 秦兰双 陈增录(550)
93. 控制最大转差的给定积分器电路.....刘惠民 李振国(553)
94. 多功能交流电机控制器  
.....丁慎栋 吴才天 王照清 林海如 黄小平 袁兰生(556)
95. 用于大功率晶体管桥式逆变器的低损耗吸收电路的分析及其参数选择  
.....黄建军 童福尧(560)
96. PWM变频调速装置中抗干扰及GTR的保护问题初探  
.....付钟庆 张燕宾 徐文高(568)
97. 用于电动机驱动的晶体管准谐振逆变器.....翁大丰(573)
98. 浅谈大功率晶体管的驱动问题.....李 宏 梁 萍(580)
99. 功率反应式步进电机的新型驱动系统——GTO交流驱动系统  
.....张文修 熊光宇(585)

## 交流调速传动的工业应用及引进技术分析

100. 同步机电齿轮在异步恒延伸轧制中的应用  
.....彭鸿才 韩安荣 王 旭 刘宗富(589)
101. 单片机矢量控制交流变频调速系统在工业应用中的几个问题及其分析  
.....邓想珍 陶绪楠 秦 忆(594)
102. 交流起重机节电型电力电子调速系统及其辨识仿真  
.....章大章 王倩华 王定亚 尹明陆 陈仲瑜(599)
103. 双馈电机矢量控制系统的最优控制规律分析.....丁蕴石 杜 沧(612)
104. 交流电动机矢量控制变频调速在收卷传动系统中的作用.....丁 培(617)
105. 交流两相伺服电动机变频调速控制系统电路分析.....罗泽兵 顾乐东(621)
106. 涤纶高速纺丝卷绕机的变频调速系统——引进装置分析.....刘亮喜(632)

107. ABB公司的电流型交—直—交变频调速装置..... 夏遂华(637)
108. 日本富士电机公司电流型变频器改进型FRENIC—2000V  
 矢量变换控制系统分析..... 白日午 梁德体 赵树华 胡建忠(642)
109. VVVF电梯的矢量控制..... 万志培(649)
110. 交流调速技术在国产高速电梯中的应用..... 龚世纓 黄声华(654)
111. 介绍一种Si型矢量控制GTR变频电源..... 徐银泉 崔葛瑾(660)
112. 一种新颖固态交流电机节能起动器..... 许宏纲 赵顺宝(666)
113. 电站锅炉风机变频调速系统特性及变速一定速  
 自动倒换装置的试验研究..... 齐春松(671)
114. 交流变频调速系统在风磨磨煤机中的应用..... 钱湘麟 李慧明(675)
115. 变频调速在焊管机中的应用..... 孔令甫 肖慕何(681)

### 交流传动系统的计算仿真及辅助设计

116. CSIM转差控制变频调速系统速度观测及系统仿真..... 高艳霞 夏新顺(688)
117. 电压型逆变器——异步电机调速系统的计算机仿真..... 张魁芳 王立文(693)
118. 变频电路系统化分析理论..... 李永东(699)
119. 感应电动机为负载的电流源逆变器稳态分析的通用状态变量法  
 ..... 朱培海 王丽敏(706)

## CONTENT

# 电力电子学和电机传动

## —最近的研究与发展方向(摘要)

博 思

(美国田纳西大学)

经过了近三十年技术发展之后,现在,电力电子学和电机传动正在工业、商业、家庭和军事部门中得到了广泛的应用。随着电力电子成本的降低和系统性能的改善,这一趋势今后还将继续不断地增长。电力电子学的历史是从本世纪初发明水银整流器开始的,此后,它经历了一段发展的时期,其中包括诸如闸流管、热阴极充气二极管、引燃管在内的充气管器件和饱和铁心磁放大器。电力电子学的真正革命开始于二十世纪五十年代末期晶闸管的发明,其后,又引入了其它类型的电力半导体器件,即电力双极型晶体管、门极可关断晶闸管(GTO)、电力场效应管(power MOSFET)和绝缘门极双极型晶体管(IGBT)。最近,高频大功率的静电感应式晶体管(SIT)、静电感应式晶闸管(SITH)和MOS控制的晶闸管(MCT)都已投入应用。从历史上看,电力电子线路和系统总是随着器件的发展而发展的。

今天的电力电子学是一门复杂的多学科的技术,它包含了电机、电力半导体器件、变换器电路、模拟与数字电子学、控制理论和微处理器等学科。最近,功率集成电路、半专用的甚大规模集成电路和高级的计算机辅助设计方法也给这门技术增添了新的范畴。每一个学科都在前进,因而也都在对电力电子技术的发展做出贡献。

电力电子系统的应用包括直流和交流可调电源、电化学过程、电子焊接、加热控制和灯光控制、电力线路的有源滤波、高压直流输电(HVDC)系统、电力变换用的光电池和燃料电池、VSCF系统、固态断路器、感应加热,还有电机传动。电机传动(直流和交流)是电力电子应用中最大最广的领域,在当今的计算机自动化工厂中,工业运动控制扮演了一个充满活力的角色。

在直流传动和交流传动这两类电气传动中,随着电力电子和数字电子成本的降低和交流传动系统性能的改善,后一类传动的普及性正在提高。矢量控制或磁场定向控制在高性能传动的应用中获得广泛的接受。最近,自整定控制、模型参考自适应控制(MRAC)和滑模控制正在传动控制系统中显示出美好的前景。

能力很强的微型计算机、数字信号处理器以及半专用甚大规模集成电路芯片的出现正意义深远地影响着电力电子系统的控制。数字控制不仅简化了电子控制,提高了可靠性,免除受噪声的干扰,而且使复杂的控制与决策规律和强有力的诊断技术得以实现。人工智能或专家控制系统在电力电子应用中也显出了广阔的前途。

本文将回顾电力电子和电机传动当前的技术状况,并预测其前景,将讨论现在应用的电

力半导体器件和先进的变换器技术, 将评论用于交流传动的先进的控制和估计技术。然后, 将把讨论集中到新的微型计算机和数字信号处理器上面。最后, 将考查电力半导体器件、变换器、电机传动以及数字控制的发展方向。

(陈伯时译)

### 参 考 文 献

- [1] B.K.Bose, "Power electronics—an emerging technology", *Proc. of IECON'88*, pp.501—510, vol.3, 1988
- [2] B.K.Bose, *Microcomputer Control of Power Electronics and Drives*, IEE Press, New York, 1987
- [3] B.K.Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, NJ, 1986
- [4] B.K.Bose, *A djustable Speed AC Drive Systems*, IEEE Press, New York, 1981
- [5] Y.Dote and B. K. Bose, *Servomotor and Motion Control Using Digital Signal Processors*, Prentice Hall (under publication)
- [6] B.K.Bose, "Evaluation of modern power semiconductor devices and future trend of converters", *proc. IEEE—IAS Annual Meeting*, 1989
- [7] B.K.Bose, "Technology trends in microcomputer control of electrical machines", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 35, pp. 160—177, Feb. 1988
- [8] B.K.Bose, "Motion control technology—present and future", *IEEE Trans. IA*, vol. 21, PP 1337—1342, Nov./Dec., 1985
- [9] B.K.Bose, "A high performance inverter—fed drive system of an interior permanent magnet synchronous motor", *IEEE Trans. IA* vol. 24, pp.987—997, Nov./Dec. 1988
- [10] B.K.Bose and P.M.Szczesny, "microcomputer—based control and simulation of an advanced IPM synchronous machine drive system for electric vehicle propulsion", *IEEE Trans. IE*, vol. 35, pp. 547—559, Nov 1988
- [11] B.K.Bose, "Sliding mode control of induction motor", *IEEE/IAS Annual Meeting Conf. Rec*, pp.411—417, 1984
- [12] B.K.Bose, "Scalar decoupled control of induction motor" *IEEE Trans. IA*, vol.20, pp. 216—225, Jan./Feb, 1984

---

• 作者 Bimal K. Bose 博士是美国田纳西大学电力电子学首席教授(Condra Chaiv of Excellence), 兼田纳西州电力电子应用中心的首席科学家。地址是: The Univeslity of Tennessee, Knoxville Tennessee 37996, USA.

# 交流电机调速技术的发展和我们的对策

杨 竞 衡

(中国自动化学会常务理事、电气自动化专业委员会主任委员)

八十年代,在电气传动自动控制领域中,出现了一个革命性的变化,那就是交流电机调速技术取得了突破性的进展,大举进入电气传动调速控制的各个领域。从数百瓦的伺服系统到数万千瓦的特大功率高速传动系统,从一般要求的小范围调速传动到高精度、快响应、大范围的调速传动,从单机传动到多机协调运转,几乎无所不包。相应地在美、日、西欧等国形成了一个交流电机调速系统的新兴产业,把过去一向为直流电机调速系统所占领的市场逐步排挤出去。据日本的统计,1975年销售的交流与直流电机调速系统之比为1:3,到1985年却变成3:1,可见其升降速度之快。

与世界发展的势头相比,我们的发展速度无疑是缓慢的。特别是在产业的形成上,更是落后。我们必须采取正确的对策,加速发展,才能挤身于这个新兴产业的行列之中,为我国的四个现代化作出应有的贡献。本文拟在分析综述交流电机调速技术发展的基础上,提出我国应如何加速发展的对策性建议意见,以供领导机关决策时参考。

## 一、交流电机调速技术发展的两个推力、三条轨迹

1. 直流电机由于具有机械式换向器这一致命的弱点而带来了一系列的限制。一是换向器表面线速度及换向电流、电压有一极限容许值,约束了单台机的转速、功率上限。超过这一极限就只能采取多电枢方案,这就增加了电机制造的难度和成本以及调速控制系统的复杂性。有些特高转速、特大功率的场合则根本无法用直流电机方案来实现。二是由于要照顾到换向器的可靠工作,电枢及换向器的直径一般都做得比较大,因此电机的转动惯量就大,这对于有快速响应要求的调速场合或是在安装场地上有尺寸要求的场合都是很不利。三是换向器必须定期停机检修,运行中也要求经常注意观察换向器的火花情况。因此,在一些恶劣条件下或人难以接近的工作场所,使用直流电机就很难保证长期运行的安全性。由于这样的一些限制,使得人们长期以来一直孜孜以求地寻找用没有换向器的交流电机实现调速来取代直流电机,突破它的限制。

2. 七十年代初出现的世界性石油危机促使人们千方百计地寻找各种节能的途径以减少对石油的依赖。于是占工业生产用电约一半的各种风机、泵、压缩机等类的电气传动系统理所当然地成为人们主要的关心对象。这类机械均采用恒速交流电机驱动,用闸阀、挡板、放空回流等办法实现流量的调节,造成电能无谓的损失。如果采用改变电机转速的办法来实现流量的调节,则由于轴功率是与流量的三次方成正比的,因此可收到十分明显的节电效果。这就是为什么七十年代以来,掀起了一股强烈的交流电机调速技术热风的原因之一。

上述两个推动力分别作用到交流电机调速技术上,形成了三条各有侧重的发展轨迹,一条是以取代直流电机调速系统为目标的高性能交流电机调速技术;另一条是以节能为目的,在风机、泵、压缩机类机械中实现简便易行、性能要求不高的调速技术;第三条是沿着直流电机调速系统一向无法涉足的特殊领域,如特大容量、特高转速的应用场合发展。

## 二、交流电机调速技术发展的理论与物质基础

尽管人们很早以前就致力于交流电机调速技术的研究,但是由于不具备理论与技术物质条件,以致长期以来未能取得突破性的进展。只有进入到七十年代,当现代控制理论、新型大功率电力电子器件、新型变频技术以及微型计算机数字控制技术等在实际应用中相继取得了重要进展的时候,才为交流电机调速技术的飞跃创造了一个坚实的基础。

### 1. 现代控制理论的应用促成了矢量控制技术的诞生,奠定了现代交流电机调速技术的理论基础

交流电机是个多变量、非线性、强耦合的被控对象。采用参数重构和状态重构的现代控制概念,可以实现其定子电流的励磁分量与转矩分量之间的解耦,从而使交流电机能像直流电机一样分别对其励磁分量及转矩分量进行独立控制,这种矢量控制法的诞生给高性能的交流电机调速技术奠定了理论基础。围绕着矢量控制法的完善化,还相继提出了多种提高矢量控制性能的方案。比如:为了去除转矩电流与励磁电流之间由于电机内部压降造成的耦合,应用了多变量解耦理论,提出了加入前馈补偿器的方法;为了解决非线性问题,采用了变结构控制;提出了低速时采用速度开环控制、高速时改用速度闭环控制的方法或低速时采用电流模型控制,高速时改用电压模型控制等方案;为了抑制轴振动,应用现代控制理论构成负载转矩观测器来推断电机的负载转矩,并将此值加入到控制系统中,可收到显著的轴振动抑制效果;为了克服转子电阻变化造成的控制误差,采用了模型规范自适应控制技术,精确地推算运行中转子电阻的变化并以此值对系统参数进行修正,或者用滑模变结构控制技术,强迫系统沿着一个预先设定的参考模型的轨迹滑动,而与电机参数及负载转矩无关等等。

交流电机调速控制理论继矢量控制之后的另一个新突破是直接转矩控制法,它避开了矢量控制中的两次座标变换及求矢量的模与相角的复杂计算工作量,而直接在定子座标系上计算电机的转矩及磁通,通过转矩的砰砰控制,使转矩响应时间控制在一拍以内,且无超调,控制性能比矢量控制还好。此法虽尚未形成商品化的产品,但却是很有发展前景的一种新的控制原理,需要抓住这个苗头,深入做完善化及商品化工作。

交流电机调速控制理论,从电压/频率比恒定控制法到矢量控制法是一个飞跃,从矢量控制法到直接转矩控制将是第二个飞跃。

### 2. 全控型大功率快速电力电子器件的进展为现代化的变频装置提供了物质保证

七十年代中期以前,作为交-直-交变频装置的核心的逆变器一直是用晶闸管来实现的,但因晶闸管的关断不可控性,必须配以大功率的强迫换流线路才能实现可靠的逆变。复杂的换流线路使变频装置的效率、可靠性、体积、成本均无法与同容量的直流电机调速装置相比。人们一直在致力于研制出一种大功率、正反向均可用较小的功率进行开通与关断控制的全控型元件,以使用较简单的手段即可实现复杂的逆变工作。经过十年左右的奋战,场效应晶体管(MOSFET)、巨型晶体管(GTR)及门极可关断晶闸管(GTO)等全控型器件终于问世并

在实际应用中取得了理想的结果,比如用GTO组成的逆变装置比用晶闸管的在安装面积上缩小24%,重量减轻34%,效率提高12个百分点,达94%。现在数千千瓦以下的交-直-交变频装置基本上已由全控型元件所占领,其中几千瓦级的小功率装置以MOSFET为主,数千瓦级的中功率装置以GTR为主,数千千瓦级的大功率装置以GTO为主,只有数千千瓦以上的特大功率的变频装置才用晶闸管组成。从半控型元件向全控制元件的过渡标志着变频装置进入了可以与直流调速装置在性能/价格比上相媲美,甚至更佳的新阶段,这是交流调速技术产生飞跃的又一个重要的突破。

目前全控型电力电子元件正沿着大电流、高电压、快通断、低损耗、易触发、好保护、小体积、集成化、模块化等方向继续在发展着,比如把MOSFET技术与GTR、GTO技术通过在芯片上的集成化出现了绝缘门极晶体管(IGT)和绝缘门极可关断晶闸管(IGTO)等,集两种元件的优点于一身,可以用逻辑电平信号直接触发、关断很大的功率。这类元件将是九十年代变频装置的主流。更进一步的目标将是把控制、触发、保护等功能再集成化进来,从而形成了电力电子与微电子复合的产品,构成最新的一代功率集成器件(PIC)。这将为九十年代之后的最新一代高可靠、小型化、电机与电控装置可能合而为一的未来型交流电机调速系统提供新的发展基础。

### 3. 脉宽调制技术的发展与应用使变频装置性能优化,可以适用于各类交流电机,为大普及创造了前提

早期以晶闸管为基础的变频装置采用的是相控原理。用相控方式生成的变频变压电源含有大量的谐波分量,功率因数差,转矩脉动大,动态响应慢,线路复杂,无法满足高性能调速系统的要求。新一代的全控型电力电子器件是快速型器件,其允许通断频率达1000~20000赫,从而为摆脱相控原理的新型逆变方案提供了新的物质基础。利用电力电子器件的高频特性,采用了脉冲宽度调制(PWM)的原理,用一系列宽度不同的按一定时间序列排列的等幅脉冲方波来逼近一条正弦曲线,产生接近正弦的电压与电流,此时电力电子器件工作在全通或全断的状态,电压与电流基本同相,功率因数好,可以克服或改善相控原理的所有弊端,能够满足高性能交流电机调速系统的要求。针对PWM波形的生成方式以及所要达到的不同目标,研制成许多实用的方案,如锯齿波比较法,微机查表法,实时算法,自激振荡法等并都在目前的商品性产品中得到了不同程度的应用。PWM新方案的研究仍然是当前交流电机调速技术的一个热门课题,新的研究成果必将进一步推动变频电路的发展,使之日臻完善。

### 4. 微型计算机在性能、速度、价格、体积等方面的不断发展为交流电机调速理论的现实化提供了最重要的保证

微型计算机作为控制系统的核心部件可以按照各种控制思想及数学模型在线地快速计算出各种中间结果,在经过比较、分析、判断后提供出最后的指令值,指挥系统中各个环节及时地进行工作,从而使十分复杂的控制思想变成成为现实的可能。它并且能利用计算调节工作的间隙时间对整个系统进行自动诊断,发现问题及隐患时能给出报警信号。一旦出现故障则可以把故障前后的一系列重要参数记忆下来,供人们做事故分析判断。有时还具有某些自我修理自我排除故障的高级功能,从而使一个十分复杂的电气自动化系统变成一个十分可靠的、有现实应用价值的商品。微机应用的早期阶段存在的精度低、速度慢、存储容量不足、软件

不丰富等缺陷在十年的发展中都先后被克服。现在16位、32位的微机已经进入了实际应用,并形成了各具特色的一整套以微机为基础的交流调速用的标准控制单元系列,非但硬件部分是模块化式的公用母线结构,系统组成可以任意扩展及修改,而且软件也已经做成标准模块形式,系统设计人员只须按照传统的控制框图设计出总的系统,并选用这些标准的硬件单元及软件单元,指出其互连的原则,插入到一个通用的带有公共母线的框架中,实现简单的电气互连,就可生成一个多微机控制的全数字化的控制系统。既不需要设计人员学习高深的软件技术和计算机语言,也不需要从头去设计一套适用于特定对象的专用的应用软件,使微机硬软件的工程化应用进入了一个高级的阶段。交流电机调速技术中的P W M变频器的工作和交流电机的复杂的解耦控制原理以及长期工作的可靠性等问题,如果没有微机技术的支撑,那是根本不存在获得其工业应用的可能性的。

### 三、交流电机调速技术的发展现状

表1 交流电机调速系统产品的现状

| 型式   | 控制      | 功率           | 变频器    |                | 输出        | 电动机           | 备注                                         |
|------|---------|--------------|--------|----------------|-----------|---------------|--------------------------------------------|
|      |         |              | 方式     | 元件             | 电流        |               |                                            |
| 高性能型 | 微机矢量控制  | 数千瓦          | 交直交电压型 | MOSFET<br>或GTR | 正弦        | 永磁同步机或笼形异步机   | 伺服系统                                       |
|      |         | 数百千瓦<br>数千千瓦 | 交直交电压型 | GTR            | 正弦        | 笼形异步机         |                                            |
|      |         |              | 交直交电压型 | GTO            | 正弦        | 笼形异步机         |                                            |
|      |         |              | 交直交电流型 | GTO            | 正弦        | 笼形异步机         |                                            |
|      |         |              | 交直交电流型 | 晶闸管            | 方波        | 笼形异步机         |                                            |
|      |         | 万千瓦          | 交交周期变频 | 晶闸管            | 梯形波<br>正弦 | 笼形异步机<br>或同步机 | 600转/分以下无环流<br>600~1500转/分有环流<br>1500转/分以上 |
|      |         | 数万千瓦         | 无换向器电机 | 晶闸管            | 方波<br>梯形波 | 同步机           |                                            |
|      |         |              |        |                |           |               |                                            |
|      |         |              |        |                |           |               |                                            |
|      |         |              |        |                |           |               |                                            |
| 普通型  | 压频比恒定控制 | 数百千瓦         | 交直交电压型 | GTR            | 正弦        | 笼形异步机         | 串级调速                                       |
|      |         | 数千千瓦         | 交直交电流型 | 晶闸管            | 方波<br>梯形波 | 笼形异步机         |                                            |
|      |         | 万千瓦          | 交直交电流型 | 晶闸管            | 方波<br>梯形波 | 绕线异步机         |                                            |
|      |         | 数万千瓦         | 无换向器电机 | 晶闸管            | 方波<br>梯形波 | 同步机           |                                            |

交流电机调速系统产品一般分为两大系列,一是普通型的,一是高性能型的,分别适用于要求不高的风机、泵、压缩机等类的调速场合及取代直流电机调速性能要求很高的场合。

从表1中可以略见当前交流电机调速系统产品的大体状况。高性能型的主要采用微机矢量控制法,数千千瓦以下的容量等级以采用笼形异步电机为主,伺服系统也有用永磁同步电机的,分别配以交-直-交电压型或电流型逆变器,并视容量的不同分别采用MOSFET、GTR、GTO三种元件组成,用PWM方法使输出电流为正弦。一万千瓦左右的低速应用场合则以采用交-交变频器、用晶闸管组成有环流或无环流系统,使用笼形异步电机或同步电机。数万千瓦级及高速传动的场合则毫无例外地均采用交-直-交变频器配同步电机的无换向器电机方式。普通型的则以采用较简便的电压/频率恒定控制法为主,既可用笼形异步电机,也可用绕线式异步电机,数万千瓦容量级的也是用无换向器电机方式。

下面举一些能代表水平的产品应用实例。

### 1. 特大容量超高速的应用

(1) 3500千瓦、4千伏、8000转/分笼形异步电机与汽轮机同轴驱动一台压缩机,采用GTO组成电压型逆变器(5000千伏安、4千伏、134赫、12脉冲,16位微机全数字控制)供电。

(2) 21000千瓦、5900转/分无换向器电机驱动裂化气体压缩机,用晶闸管变频器、12脉冲。1984年投运。

### 2. 高性能轧机上的应用

(3) 6000千瓦、800/1400转/分无换向器电机驱动高速线材、棒材不可逆连轧机主传动,12脉冲,转矩脉动 $\sim 5\%$ ,弱磁1:3,转速精度 $\pm 0.01\%$ 。

(4)  $2 \times 10900$ 千瓦、250%过载、58.5/112.5转/分同步电机驱动5.5米厚板可逆热轧机,交-交变频器供电。1985年12月投运。与直流电机调速系统相比,投资大致相等,但转子惯量减少26%,损耗减少30%、维护时间减少80%。

(5) 用晶闸管有环流的交-交变频器供电、笼形异步电机驱动的冷连轧机主传动,用3台16位微机控制,动态响应速度60rad/秒,弱磁范围1:6,调速精度 $\pm 0.01\%$ 。该轧机为全部采用交流电机传动的冷连轧机,1987年1月投运。

### 3. 高速电梯的应用

(6) 用GTR组成电流型逆变器、笼形异步电机传动的高速电梯(1600公斤,240米/分),用两台单片微机实现正弦PWM控制,用两台16位微机实现矢量控制,该两台微机可互相监视诊断。1986年投运,取得了节电10%、电源设备容量节约30%、谐波减少80%、安装面积减半、卷扬机重量减轻40%的显著效果。

### 4. 在风洞上的应用

(7) 22500千瓦、70~710转/分无换向器电机传动,变频器由水冷晶闸管组成,用两台16位微机及两台8位微机构成多微机系统实现全数字式矢量控制,速度控制精度 $\pm 0.03\%$ 。

(8) 6710千瓦、4160伏绕线形异步电机串级调速传动,12脉冲晶闸管整流-逆变控制,调速范围0~70%,1984年投运。

### 5. 现有同步电机传动的改造

(9) 13000千瓦同步电机传动烧结机主排风机,原由挡板调节风量,现改为无换向器电机方式调速控制,轴上不必带传感器,用水冷晶闸管组成变频器,多微机矢量控制,12脉