



航空电源航空科技重点实验室

第三届电力电子与运动控制学术年会

APSC'2002

论文集

2002年10月·南京航空航天大学



航空电源航空科技重点实验室

第三届电力电子与运动控制学术年会

APSC'2002

论文集

2002 年 10 月 • 南京航空航天大学

A handwritten signature in black ink, likely belonging to a member of the organizing committee, is written over the text '2002 年 10 月 • 南京航空航天大学'.

前 言

在 APSC'2002 学术年会召开之际,正是我校 50 周年校庆的大喜日子,让我们共同庆祝我校建校 50 周年,希望在下一个 50 年内,南航成为一所国际知名的研究型大学。

今年是 APSC 第三届学术年会,借我校 50 周年校庆的机会,有幸邀请到电力电子和运动控制领域的国内著名专家和学者参加我们的学术活动,作学术报告和指导我们的工作,预计到校的贵宾有:浙江大学汪樾生教授(工程院院士),清华大学韩英铎教授(工程院院士),上海大学陈伯时教授,中科院等离子所季幼章教授(中国电源学会理事长),福州大学陈为教授,浙江大学钱照明教授、何湘宁教授、应建平教授,光宝电子北京实验室主任孙晓东,GE 公司上海研发中心袁晓明博士等。他们的莅临必将促进实验室科学研究和学术活动的发展。

实验室的全体老师和学生积极参加我校的校庆活动,认真撰写学术论文,为了提高论文质量,不少同志反复修改论文,甚至进一步做了仿真和实验验证工作;不少老师认真审阅稿件。对此表示忠心感谢。但是,由于时间匆促和水平有限,肯定还有不少错误和不足之处,请予批评指正。

电力电子和运动控制技术在新的世纪中将有更大的发展,首先是它的应用领域不断拓展,电力电子将深入到国民经济的各个部门,实现节能,环保和装置以及系统性能的提高。需求的牵引和技术的发展,带动了电力电子器件的进步,电路拓扑和结构工艺的发展,使之更适合于各部门的应用。

飞机 270V 高压直流电气系统是电力电子和运动控制技术在航空上应用的典范。几十年前,某些大型飞机上应用了高压直流电,但因无刷直流电机和无触点电器没有诞生,高压直流电源无法推广。电工材料,计算机和电机控制理论的发展,特别是电力电子器件的发展,为无刷直流电机和无触点电器的发展奠定了基础。推动了飞机高压直流电气系统的发展,而高压直流电气系统是第四代战斗机发展的基础之一,也是全电和多电飞机发展的基础之一,这将是电工科技对航空科技发展的重大贡献。多电和全电飞机实现了飞机内部二次能源的统一,飞机的可靠性,维修性,体积重量,全周期费用和性能均将发生重大的变化。

在此,我代表航空电源航空科技重点实验室的全体同志向光临学术报告会的校内外贵宾和专家表示热烈的欢迎,祝你们工作愉快,身体健康!

论文集的排版工作由李春燕和王学华两位研究生完成,在此表示衷心的感谢!

严仰光

2002 年 10 月

目 录

一、综述

1.1 信息化时代的电气传动·····	陈伯时	1
1.2 托卡马克装置电源系统·····	季幼章	11
1.3 开关电源 EMC 设计研究现状及发展·····	钱照明 袁义生	22
1.4 飞机电气系统综合化历史与发展·····	严仰光 孟小利	36
1.5 无速度传感器永磁同步电机直接转矩控制系统·····	胡育文 田 淳 顾毅康 游志青	40

二、直流变换器

2.1 三电平变换器——一种适用于高压大功率变换的直流变换器 ·····	阮新波 李 斌 陈乾宏	48
2.2 非隔离三电平变换器中分压电容均压的一种方法·····	阮新波 危 建 薛雅丽	57
2.3 输入输出共地的三电平变换器·····	阮新波 危 建 薛雅丽	63
2.4 零电压零电流开关复合式 PWM 全桥三电平变换器·····	阮新波 李 斌	69
2.5 零电压开关复合式 PWM 全桥三电平变换器·····	陈志英 阮新波	79
2.6 Buck 三电平变换器·····	薛雅丽 李 斌 阮新波	92
2.7 Sepic 三电平变换器·····	危 建 阮新波	103
2.8 软开关 PWM Boost DC-DC 全桥变换器·····	周林泉 阮新波	111
2.9 一种新颖的 ZCZVS PWM Boost 全桥变换器·····	周林泉 阮新波	120
2.10 改进型倍流整流方式 ZVS PWM 全桥变换器的设计·····	王建刚 阮新波 陈乾宏	130
2.11 零电压开关 PWM 推挽三电平变换器·····	马运东 阮新波 严仰光	139
2.12 具有箝位电路的 ZVS PWM 推挽三电平变换器·····	马运东 阮新波 严仰光	148
2.13 零电压开关多谐振三电平 DC-DC 变换器的优化设计·····	金 科 阮新波	157
2.14 48V 输入电压调节模块的现状与未来·····	梁小国 危 建 阮新波	169
2.15 大功率 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的研究·····	丁志刚 胡育文	180
2.16 推挽正激电路的 ZCS 方案·····	张方华 王慧贞 严仰光	188
2.17 有源箝位反激变换器分析与设计·····	张兰红 陈道炼 胡育文	193
2.18 双管正-反激组合变换器的研究 ·····	石健将 洪 峰 严仰光	198
2.19 双管正-反激组合变换器断续模态研究 ·····	洪 峰 石健将 严仰光	209

2.20 几种功率场效应管的高频驱动电路的研究应用..... 胡江毅 易旭东 龚春英 218

2.21 DC/DC 变换器输入滤波器的设计.....朱成花 石健将 严仰光 222

2.22 复合结构与两级式变换电加工电源研究及其性能对比分析
..... 穆新华 豆飞进 吴文江 230

三、功率因数校正变换器

3.1 基于双 Boost 的功率因数校正预调节器.....李 冬 阮新波 235

3.2 三相有源 PFC 拓扑及其控制策略..... 方 宇 邢 岩 241

四、逆变器

4.1 一种新颖的滞环电流型双 BUCK 逆变器 刘 军 王慧贞 严仰光 249

4.2 运用 SVM 控制的四桥臂三相逆变器的仿真..... 熊 宇 龚春英 254

4.3 基于 DSP 的空间矢量 PWM 逆变器的研究.....陈常清 邓智泉 261

4.4 耦合电感在逆变器并联系统中的应用..... 陈良亮 胡文斌 严仰光 267

4.5 三态调制与两态调制逆变器稳定性线性分析及比较..... 魏少华 王慧贞 273

4.6 三态滞环控制单相逆变器建模与动态性能分析..... 朱成花 石健将 严仰光 278

4.7 逆变器智能电压调节研究李春燕 严仰光 284

4.8 基于 MATLAB/PSB 的逆变器系统的仿真研究与实现..... 魏少华 陈良亮 王慧贞 289

4.9 基于 DSP 的 SVPWM 波实时生成方法..... 徐 慧 肖 岚 严仰光 294

4.10 基于 DSP 的脉宽调制阶梯波逆变器数字控制方案研究
.....陈 勇 谢少军 韩 军 张 勇 299

4.11 数字化控制 UPS 中 TMS320F240 与 MCS-51 单工通信的实现方法... 吴 渭 邢 岩 307

4.12 三相在线式 UPS 的数字化控制..... 陈 佳 邢 岩 313

4.13 逆变电源的数字化电压调节器实现方法..... 向建玲 吴 渭 邢 岩 320

五、运动控制

5.1 笼形异步起动/发电机设计特点及在独立电源系统中的应用... 顾春雷 胡育文 黄文新 325

5.2 基于重复控制技术改善逆变电源性能方法的研究.....游志青 陈 宏 胡育文 330

5.3 开关磁阻电机电流-磁链法位置估算的仿真分析.....刘 闯 吴宝善 335

5.4 直接励磁控制的开关磁阻发电机及其试验研究.....朱学忠 吴 韬 刘 闯 刘迪吉 340

5.5 开关磁阻电机发电运行强励方案的研究与实践.....吴 韬 朱学忠 刘迪吉 345

5.6 开关磁阻发电机主电路的一种新拓扑..... 严加根 吴 韬 姚国飞 刘迪吉 350

5.7 永磁同步伺服系统的位置检测与初始定位.....陈 荣 严仰光 邓智泉 355

5.8 双凸极电机电动运行过程中开关状态分析.....胡勤丰 刘 闯 严仰光 361

5.9 永磁磁轴承用三态 PWM 功率放大器的研究..... 臧晓敏 邓智泉 364

5.10 径向永磁磁轴承的原理及参数设计..... 赵雪山 邓智泉 王成华 369

六、电磁兼容、电力电子封装及其他

6.1 全桥变换器中寄生参数对传导 EMI 的影响.....刘 佳 穆新华 杨志勇 376

6.2 功率电子模块的构成及封装技术的发展.....何礼高 邓智泉 383

6.3 一种基于第四代 IPM 的集成化小功率逆变器设计..... 仇志坚 何礼高 邓智泉 390

6.4 某型飞机交流发电机负载电流限制的实现.....张卓然 杨善水 陈志辉 严仰光 396

6.5 PIC 单片机在控制面板设计上的应用.....杨 钢 何礼高 邓智泉 403

信息化时代的电气传动

陈伯时 (上海大学)

摘要: 当前世界上正处于信息化的时代, 而我国工业化尚未完成, 以信息化带动工业化是我们的重要任务。电气传动是工业化的重要基础。正如人体, 信息技术好比大脑和神经, 生产机械好比四肢, 电气传动则是牵动四肢运动的肌肉与骨骼, 大脑再聪明, 如果肌肉与骨骼不灵, 人体也只能瘫痪。当然电气传动也要适合信息化时代的需要而发展。信息化时代的电气传动技术包含三方面的主要内容: (1) 数字控制和数据通信成为电气传动控制的主要手段, (2) 电力电子变换器是信息流与物质/能量流之间必需的接口, (3) 可控交流电气传动逐步取代直流传动已经成为不争的事实。

叙词: 信息化 电气传动 数字控制 数据通信 电力电子变换器 可控交流传动

当前, 世界这艘航船正行驶在信息化海洋之中, 信息技术已成为推动生产力发展的重要动力。我国在生产力特别是科学技术方面总体上虽然还比较落后, 但在党中央的英明领导下, 正迎头赶上信息化的浪潮, 信息产业及其应用正在蓬勃发展, 成为覆盖现代化建设全局的战略举措。然而, 许多先进的工业国家是在完成了工业化的历史任务后向信息化的时代迈进的, 他们开发信息产业具有雄厚的基础。而我国还是以农业为主的国家, 根据去年第 5 次人口普查的统计, 乡村人口还占总人口的 63.91%, 我国的工业化尚未完成, 基础工业还比较薄弱。所以必须在发展信息化的同时, 特别强调“以信息化带动工业化”, 才能“发挥后发优势, 实现社会生产力的跨越式发展”(《中共中央十五届五中全会公报》)。

所谓电气传动, 是指用电动机把电能转换成机械能, 去带动各种类型的生产机械、机动车辆以及生活中需要运动的物品。自从人类发明并掌握各种机械帮助自己劳动以来, 就需要有推动机械的原动力, 除人力本身外, 最初使用的是畜力、水力和风力, 后来又发明了蒸汽机、柴油机、汽油机, 19 世纪才发明电动机。由于 (1) 电机的效率高, 运转比较经济, (2) 电能的传输和分配比较方便, (3) 电能容易控制, 因此现在电气传动已经成为绝大部分机械的传动方式, 成为工业化的重要基础。

在信息化浪潮中, 信息技术带动着先进生产力的发展, 这是无可争辩的事实。因此, 人们多热衷于通信、计算机以及软件等行业, 电气传动技术多少有些受到冷淡。但必须注意的是, 电气传动是工业化的重要基础, 信息本身并不能直接让机器转动, 信息技术必须通过电气传动才能带动工业化。正如在人体中, 信息技术好比是大脑和神经, 生产机械好比是四肢, 电气传动则是牵动四肢运动的肌肉与骨骼。大脑再聪明, 如果肌肉和骨骼不灵, 人体也只能是瘫痪的。当然, 电气传动技术也必须在信息技术的推动下, 适应信息化时代的需要而向前发展, 才能真正成为以信息化带动工业化的关键环节。

1、数字控制和数据通信成为电气传动控制的主要手段

最早的自动控制手段是机械控制, 后来逐步让位于电气控制和电子控制。近代的电气传动控制手段几乎都是电子控制, 常用的电子控制方法有两种: 模拟控制和数字控制。自 20 世纪

70 年代以来,体积小、耗电少、成本低、速度快、功能强、可靠性高的大规模集成电路微处理器已经商品化,把电子控制推上了一个崭新的阶段,以微处理器为核心的数字控制简称(微机数字控制)成为现代电气传动系统控制器的主要形式。目前,常用的微处理器有:单片机(SCP)、数字信号处理器(DSP)、精简指令集计算机(RISC)和包含微处理器的高级专用集成电路(ASIC)。

由于计算机除一般的计算功能外,还具有逻辑判断和数值运算的能力,因此数字控制和模拟控制相比有两个突出的优点:(1)数字控制器能够实现模拟控制无法实现的各种比较复杂的控制策略,(2)数字控制系统能够完成故障的自诊断,提高诊断过程的智能化。

1.1 数字控制器的卓越功能

PID 控制是自动控制系统最常用的控制方法,在反馈控制系统中,给定信号与反馈信号的偏差、偏差的积分和偏差的微分分别代表了系统输出的当前、过去和将来三种状态,它们反映了控制系统的全部信息。现在就以 PID 控制为例来说明数字控制器的卓越功能。

在电气传动控制系统中,最常用的 PID 控制就是 PI 调节器,其中,比例控制能快速响应控制作用,而积分控制是偏差的积累,能最终消除稳态误差。把模拟式的 PI 调节器数字化后,其第 k 拍输出 $u(k)$ 和输入误差信号 $e(k)$ 的关系可用差分方程表示:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I T_{sam} \sum_{i=1}^k e(i)$$

式中, T_{sam} 为采样周期。由此式可见,只要有偏差存在, P 和 I 就同时起作用,如果两种作用都很强,它们的目的虽然都能达到,在控制过程中却不可避免地会产生超调,严重时将导致系统振荡。采用微机数字控制时,可以不拘泥于将模拟控制器简单地数字化,还可以充分利用计算机的功能加以改进。

譬如说,采用积分分离法,把 P 和 I 分开处理。当偏差大时,只让比例部分起作用,以快速减少偏差。当偏差低到一定程度后,再将积分投入,以最终消除稳态误差。这样两种作用各得其所,避免了控制过头的矛盾,提高了系统的控制性能。积分分离算法的表达式为

$$u(k) = K_p e(k) + C_I K_I T_{sam} \sum_{i=1}^k e(i)$$

$$\text{其中 } C_I = \begin{cases} 1, & |e(i)| \leq \delta \\ 0, & |e(i)| > \delta \end{cases} \quad \delta \text{ 为一常值。}$$

采用积分分离法能够有效地抑制振荡,或减小超调。

可是,在设计自动控制系统的 PI 调节器时,参数 K_p 和 K_I 的选择是依赖于控制对象数学模型的,如果在设计完成以后对象的参数发生变化,而调节器的参数未变,控制性能就会变差,也就是说,这种系统的鲁棒性不高。近代智能控制方法如专家系统、模糊控制、神经元及其网络控制等,其突出特点是:控制算法不依赖于或不完全依赖于对象模型,因而系统具有较强的

鲁棒性。

采用单神经元和专家系统相结合的方法，可以构成一类智能型的 **PID** 调节器。例如在调速系统中，以转速偏差、偏差的积分和实际转速变化率为控制信号，在不同条件下，改变三种信号的加权系数，合理地综合这些信号，使系统在允许条件下，既能尽快消除转速偏差，又不产生或少产生超调，达到最佳运行状态。这样的智能控制系统的动态性能将大大优于传统的 **PI** 调节系统。而且，其动态性能仅仅决定于系统的实际偏差及其变化率，与控制对象参数无关，因而鲁棒性也很强。

这种智能型 **PID** 调节器的结构原理如图 1 所示，其中， $x_1 = e$ 为转速偏差、 $x_2 = \int e dt$ 为转速偏差的积分、 $x_3 = -\frac{dn}{dt}$ 为实际转速变化率的负值。按照专家系统的方法，根据转速偏差、转速偏差的积分和实际转速变化率的负值所在的区间确定调整规则，并根据它们的大小决定调整的强度，使智能型 **PID** 调节器参数随着偏差的变化而有选择地变化。当偏差大时，停止积分，并调整比例系数 K_p ，使系统以最大的能力消除偏差；当偏差小时，投入积分，并逐步调整比例系数 K_p 和积分系数 K_i ，使系统以最佳过程达到稳态。

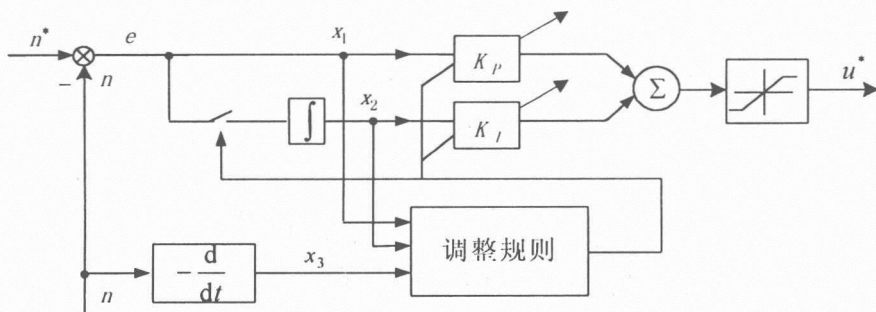


图 1 一类智能型 **PID** 调节器的结构原理图

调整规则可归纳为：

$$\text{if } e > \delta \quad \text{then} \quad K_p = \frac{u_{\max}^*}{|e|}, \quad x_2 = \int e dt \text{ 设置为 } 0$$

$$\text{if } e \leq \delta \text{ and } x_1 x_3 < 0 \quad \text{then} \quad K_p(q+1) = K_p(q) + \eta_{p1} x_3 / x_1$$

$$\text{if } e \leq \delta \text{ and } x_1 x_3 > 0 \quad \text{then} \quad K_p(q+1) = K_p(q) + \eta_{p2} x_1 x_3$$

$$\text{if } e \leq \delta \text{ and } x_1 x_3 \neq 0 \quad \text{then} \quad K_i(q+1) = K_i(q) + \eta_i x_1 x_2$$

$$\text{if } e \leq \delta \text{ and } x_1 x_3 = 0 \quad \text{then} \quad K_p, K_i \text{ 不变}$$

其中， q 为学习次数， η_{p1} 、 η_{p2} 和 η_i 分别为比例系数 K_p 和积分系数 K_i 的调整速率， δ 可视具体情况取作额定转速的 10%-20%。

与传统 **PI** 控制系统相比，采用智能型 **PID** 调节器的控制系统响应速度快，超调量小，且动态性能仅决定于系统的实际偏差及其变化率，与控制对象的参数无关，因而鲁棒性很强。

1.2 数字控制系统的故障检测、保护与自诊断

能够实现较全面的故障自诊断是计算机数字控制系统的另一优点。利用计算机的逻辑判断与数值运算功能,对实时采样的检测数据进行必要的处理和分析,再利用故障诊断模型或专家知识进行推理,可对故障类型和/或故障发生的部位做出正确的判断,这就是故障自诊断。计算机故障自诊断虽然还不能完全取代人工故障诊断,但计算机系统能真实可靠地记录发生故障的时刻及其前一段时间内系统的运行状态,为人们的最终判断提供有力依据,这又是单纯人工诊断所不能及的。

1.3 数据通信在电气传动系统中的应用

对于单台生产设备的电气传动,一般只要构成微处理器-电力电子变换器-电动机系统就可以了。如果控制和管理的任务比较复杂,可采用多微机系统,这时,在各台微机之间必须建立数据通信通道。常采用串行通信接口,如 RS232,RS422,RS485 等,其硬件简单,但传输速率不高。

对于规模生产的生产线,往往需要多台设备的连续协调控制,则可用 PLC 控制几台设备,再由上位机指挥若干台 PLC。上位机、PLC、各台控制器和检测元件之间的信息联系(指令信息、反馈信息、监测信息)过去都要通过密密麻麻的控制电缆,现在则代之以现场总线(如 PROFIBUS, CAN, LonWorks, FF, HART, Interbus 等),在生产设备现场和控制室之间实现全数字化、双向、多点的串行通信网络,它具有开放统一的通信协议,其传输速率高(可达 1.5~12Mbps)、通信距离长(可达 500~10000m)、出错概率低。现场总线还可与因特网(Internet)、企业内部网(Intranet)相连,使自动化系统与现场设备成为企业信息系统和综合自动化系统的一个组成部分,于是,电子控制又由数字化进一步发展到网络化。

2、电力电子变换器是信息流与物质/能量流之间必需的接口

电力电子技术是信息流与物质/能量流之间的重要纽带,如果没有电力电子变换,没有弱电控制强电的接口,则信息始终就是信息,不可能真正用来控制物质生产。现在,电力电子技术的发展正处于壮年期,新的电力电子器件和变换技术仍在不断涌现出来。

电力电子器件的发展已经经历过三个平台:(1)晶闸管(SCR),(2)GTR 和 GTO,(3)MOSFET 和 IGBT。目前,市场上能够广泛供应的 IGBT 其电压和电流容量都有限,一般只够中、小容量的低压电气传动使用。容量再大时,还得采用 GTO,而 GTO 的可靠性总是不能令人满意的。于是世界上很多电力电子企业和研究部门都在努力开发新型的高压功率开关器件,已经问世的有 IGCT, IEGT 以及 3300~6000V 的 IGBT 等,可供中压、大容量电气传动使用。电力电子器件的进一步发展方向是:模块化和集成化、高频化、改善封装、采用新材料(如 SiC)等。

在电力电子变换器中,用于控制直流电机的主要是由全控器件组成的斩波器或 PWM 变换器,以及晶闸管相能量传输可逆、可省去直流滤波电容等优点,但主电路略嫌复杂,如果能成功地开发出双向 IGBT 模块,则结构可大为简化。

值得一提的是,信控整流器。用于控制交流电机的主要是变压变频器,其中中、小容量的

多为 PWM 变换器。常用的交流 PWM 控制技术有：

- (1) 基于正弦波对三角波脉宽调制的 SPWM 控制；
- (2) 基于消除指定次数谐波的 HEPWM 控制；
- (3) 基于电流滞环跟踪的 CHPWM 控制；
- (4) 电压空间矢量控制 (SVPWM 控制)，或称磁链轨迹跟踪控制。

以上 4 类 PWM 变换器中，前两类是以输出电压接近正弦波为控制目标的，第 3 类以输出正弦波电流为控制目标，第 4 类则以被控电机的旋转磁场接近圆形为控制目标。显然第 4 类的效果最好，而且是直接控制功率器件的开关状态，算法简单，故应用最广。

随着电力电子变换器的日益普及，谐波和无功电流给供电电网造成的“电力公害”越来越值得重视。解决这个问题的办法有二：(1) 采用有源滤波和无功补偿装置，(2) 开发“绿色”电力电子变换器。后者要求功率因数可控，各次谐波分量小于国际和国家标准允许的限度，显然这是一种治本的办法。

目前已经应用的绿色变换器有：双 PWM 交-直-交变换器、多单元串联的中压变换器、多电平中压变换器等。受到普遍重视还在开发的有：交-交矩阵式变换器，它具有输入电流和输出电压都接近正弦波、信息产业本身也已成为电力电子装置的一大用户，主要是用作电源和微小容量的电气传动，例如：计算机和通信设备的开关电源、不停电电源 (UPS)、电子产品中的电气传动装置等。

3、可控交流电气传动逐步取代直流传动已经成为不争的事实

直流电气传动和交流电气传动在 19 世纪先后诞生。在 20 世纪大部分年代里，鉴于直流传动具有优越的可控性能，高性能可调速传动一般都用直流电机，而约占电气传动总容量 80% 的不变速传动或简单调速传动则采用交流电机，这种分工在当时已成为举世公认的格局。直到 20 世纪 70 年代，由于采用电力电子变换器的高效交流变频传动开发成功，结构简单、成本低廉、工作可靠、维护方便、效率高、转动惯量小的交流笼型电机进入了可调速领域，一直被认为天经地义的交直流传动按调速分工的格局终于被打破了。此后，交流调速传动主要沿着下述三个方向发展和应用：(1) 一般性能的节能调速和工艺调速，(2) 高性能交流调速系统，(3) 特大容量、极高转速的交流传动。

交流电机有异步电机和同步电机两大类。异步电机的调速传动种类繁多，过去往往从表面上罗列各种调速方法，而未能抓住其本质。从能量转换的角度上看，把从定子传入转子的电磁功率 P_m 分成两部分：一部分 $P_{mech} = (1-s)P_m$ 是拖动负载的有效功率，称作机械功率；另一部分 $P_s = sP_m$ 是传输给转子电路的转差功率，与转差率 s 成正比。调速时，转差功率是否增大，是消耗掉还是得到回收，是评价调速系统效率高低的标志。从这点出发，可以把异步电机的调速系统分成三类：(1) 转差功率消耗型调速—如降电压调速、绕线电机转子串电阻调速；(2) 转差功率回馈型调速—如绕线电机串级调速、双馈调速、内馈斩波调速；(3) 转差功率不变型调速—如变压变频调速、变极对数调速。各种调速方法各有其用途，目前应用最普遍的是笼型转子电机变压变频调速。

同步电机没有转差功率，故其调速只能是转差功率不变（恒等于 0）型的，只能靠变压变频调速。开关磁阻电机是一种特殊型式的同步电机，有其独特的比较简单的调速方法。

为了适应生产工艺的进步、节约能源以及自动化的需要，交流调速系统的控制策略也在不断发展。与直流电机不同，交流电机的动态数学模型是非线性、多变量、强耦合的，因此其控制策略也比较复杂，下面以笼型异步电机变压变频调速为例，介绍交流传动控制的发展脉络。

3.1 基于稳态模型的控制策略

在开始研究和应用交流调速时，人们对交流电机的动态模型还不十分清楚，只能从其稳态模型出发来探讨调速方法。为了充分利用电机铁心，希望在调速时保持磁通不变，应使定子感应电动势与频率成正比，如果忽略定子电阻，可近似为定子电压与频率成正比，于是出现了恒压频比的控制方法。至今这种方法仍普遍应用于没有高动态性能要求的节能调速和一般工艺调速中，例如风机、水泵调速。

如果对调速性能有一定要求，可采用转速闭环控制。从异步电机稳态模型可以证明，当磁通恒定时，电磁转矩近似与转差频率成正比，因此控制转差频率就相当于控制转矩。采用转速闭环的转差频率控制，可得到平滑而稳定的调速，获得较高的调速范围。

3.2 基于动态模型的控制策略

在一般条件下，直流电机传动系统可视为三阶线性单变量（单输入单输出）系统，而异步电机则复杂得多，假设（1）忽略磁动势的空间谐波，（2）忽略磁路饱和，（3）忽略铁心损耗，（4）不考虑环境变化对电阻的影响，这时异步电机是一个高阶、非线性、多变量（双输入双输出）系统。其动态结构图示于图 2：

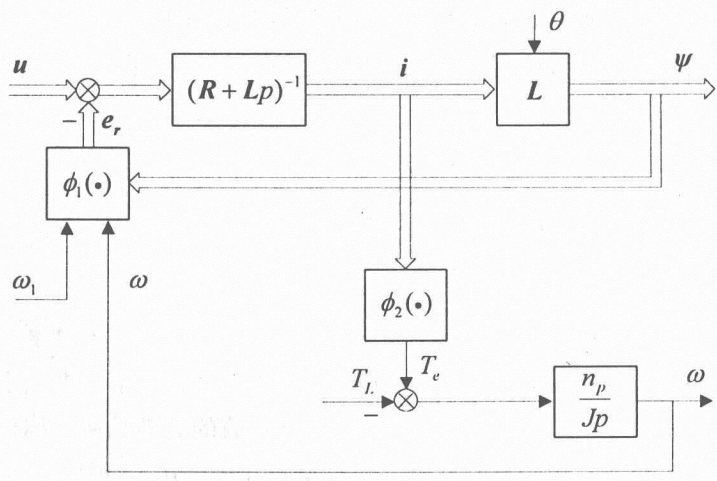


图 2 异步电机的多变量非线性动态结构图

由图可见，耦合与非线性因素主要存在于产生旋转电动势 e_r 的环节 $\phi_1(\cdot)$ 和产生电磁转矩 T_e 的环节 $\phi_2(\cdot)$ 之中。

鉴于异步电机动态模型的复杂性，按照动态规律来控制必然需要比较复杂的控制算法，这时采用数字控制恰好能使计算机的优越性得以发挥。现已获得广泛应用的高动态性能异步电机

控制系统有两种：矢量控制系统和直接转矩控制系统。

采用三相-两相坐标变换和按转子磁链定向的同步旋转坐标变换可以将动态模型简化成图 3 所示：

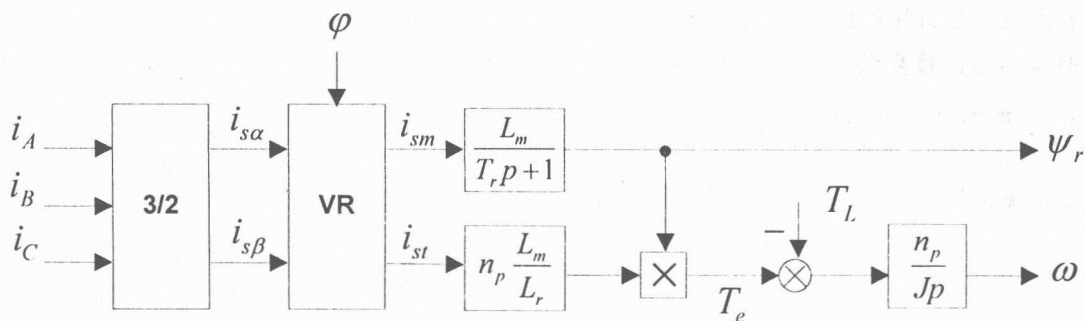


图 3 异步电机矢量变换与电流解耦数学模型

图中， i_{sm} 和 i_{st} 是定子电流的励磁分量和转矩分量，它们与转子磁链 ψ_r 和电磁转矩 T_e 的关系如下：

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sm}$$

$$T_e = \frac{n_p L_m}{L_r} i_{st} \psi_r$$

由此可见，采用坐标变换和按转子磁链定向可以把异步电机等效成类似直流电机的模型，从而可以仿照直流电机进行控制，这就是异步电机的矢量控制系统。它和直流电机控制系统稍有区别的是，在直流电机中，磁通 Φ 是恒定的（忽略电枢反应），而在异步电机中，转子磁链 ψ_r 在动态过程中是可控的变量，须利用磁链模型进行计算。常用的磁链模型有：

转子磁链的电流模型：

$$\psi_{r\alpha} = \frac{1}{T_r p + 1} (L_m i_{s\alpha} - \omega T_r \psi_{r\beta})$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{1}{T_r p + 1} (L_m i_{s\beta} + \omega T_r \psi_{r\alpha})$$

转子磁链的电压模型：

$$\psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt - \sigma L_s i_{s\alpha} \right]$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt - \sigma L_s i_{s\beta} \right]$$

转子磁链的电流模型受转子电阻等参数变化的影响，会使计算出的转子磁链幅值和方向失真，这样就降低了常规矢量控制系统的鲁棒性。电压模型虽然不受转子电阻影响，但低速时误差大，

会使调速范围受到限制。当要求调速范围较宽时,须配合使用电压模型和电流模型。

直接转矩控制系统舍去了比较复杂的旋转坐标变换,仅在二相静止坐标系上构成转矩和定子磁链反馈信号,并用双位式砰-砰控制代替线性调节器来直接控制转矩和定子磁链,根据二者的变化选择电压空间矢量(SVPWM)的开关状态,以控制电机的转速。为了得到反馈信号,所采用的计算模型是:

转矩模型:

$$T_e = n_p (i_{s\beta} \psi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{s\beta})$$

定子磁链模型:

$$\begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \psi_{s\beta} &= \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{aligned}$$

这仍是一种电压模型,和上述的转子磁链电压模型存在同样的优缺点。直接转矩控制系统的结构简单,转矩响应快,定子磁链模型不受转子参数变化的影响,但输出转矩有脉动,磁链模型在低速时误差大,使系统的调速范围受到限制。

3.3 无速度传感器的高动态性能调速

上述高动态性能的交流传动系统都需要转速闭环控制,所需的转速反馈信号来自与电机同轴的速度传感器,其成本、安装、可靠性都有问题。如果能取消速度传感器而保持良好的控制性能,显然会大受欢迎的。目前,已有若干品种的无速度传感器高性能调速系统问世,而研究工作仍在继续。

在无速度传感器控制系统中,可以通过容易测量的定子电压和电流信号间接求得转速。常用的方法有:(1)利用电机模型推导出转速方程式,从而计算转速;(2)利用电机模型计算转差频率,进行补偿;(3)根据模型参考自适应控制理论,选择合适的参考模型和可调整模型,同时辨识转速和转子磁链;(4)利用其它辨识或估计方法求得转速;(5)利用电机的齿谐波电势计算转速;等等。但是,无论哪一种方法,都难以保证很高的精度和很准确的动态转速,因此目前实用的无速度传感器调速系统只能实现一般的动态性能,其调速范围不过 10:1 左右。

3.4 异步电机调速系统控制策略的发展

鉴于按转子磁链定向的矢量控制系统和按定子磁链控制的直接转矩控制系统都有一些不足之处,对高性能异步电机调速系统控制策略的研究仍是一个热门的课题。最直接的方法就是在现有的两种系统之间取长补短,设计一种按定子磁链定向的矢量控制系统,如果能在控制算法中完全摆脱转子电阻等参数,应该能够获得更好的控制性能和鲁棒性。

另一个途径是应用合适的非线性控制理论来实现异步电机的高性能控制,在这方面,已经取得的成果有:

- (1) 非线性反馈解耦 (Nonlinear Feedback Decoupling) 与精确线性化 (Exact Linearization) 控制,
- (2) 基于无源性 (Passivity) 的能量成型 (Energy Shaping) 非线性控制,
- (3) 基于逐步后推 (Backstepping) 设计方法的非线性控制, 等等。

虽然理论上的成果累累,但由于它们的共同基础是已知参数的电机模型,参数的变化仍不可避免地要影响控制系统的鲁棒性,因而至今尚未形成能够取代已有系统的实用的新型系统。不过,理论研究总是有助于认清控制系统本质的。

在经典的和近代的控制理论基础上提出的控制策略都有一个共同的问题,即控制算法依赖于电机模型,自适应控制和滑模变结构控制曾是人们希图用来解决这个课题的良药,却又发现它们各有其不足之处。近年来受到控制界十分重视的智能控制,由于它能摆脱对控制对象模型的依赖,自然引起人家的瞩目。已经获得实际应用智能控制方法有:专家系统、模糊控制、神经网络、遗传算法等。开始研究交流传动系统的智能控制时,人们往往把已有一定应用经验的方法移植过来,虽然能够解决一些问题,却常因算法太复杂而不能实用。在这里应该注意,电机模型基本上是确定的,只是由于参数变化和扰动作用而受到影响,没有必要完全甩掉经典控制方法而采用纯粹的智能控制,这样做一定是事倍功半。应该在按模型控制的基础上,增加一定的智能控制手段,以消除参数变化和扰动的影响,这是在传动控制系统中引入智能控制的合理途径。用于交流传动控制的一种比较好的智能控制方法是,采用单神经元作为转速调节器的矢量控制系统,如图4所示:

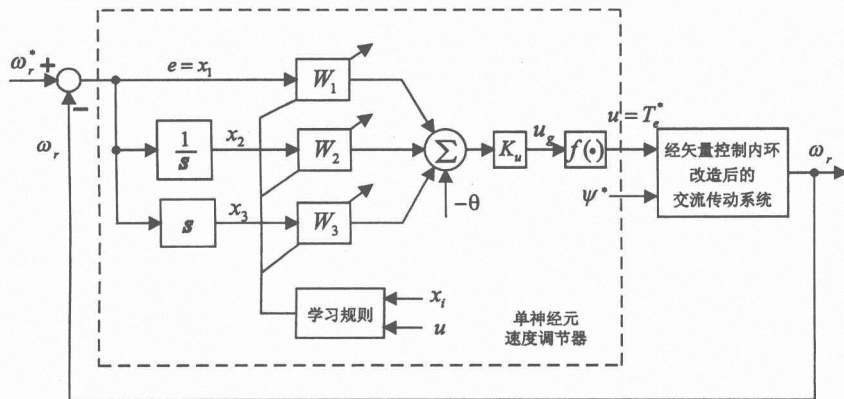


图4 单神经元自适应PID控制的矢量控制系统

另一种方法就是本文图1所示的智能型PID调节器。

3.5 同步电机调速系统的控制策略

前已指出,同步电机只能采用变压变频调速,其变压变频的原理和方法与异步电机调速基本相同。采用独立的变压变频器给同步电机供电的调速系统叫做他控式变频调速系统。由于同步电机运行时能保持严格的同步转速,如果在电机轴上安装一个能反映转子磁极位置的装置,称作转子位置检测器,用它发出的转子位置信号来控制变频器换相,则为自控式变频调速系统。

常用的他控变频同步电机调速系统有:(1)小容量同步电机群恒压频比控制系统,(2)由交-直-交电流型负载换流变压变频器供电的同步电机调速系统,(3)由交-交变压变频器供电的大型低速同步电机调速系统,(4)按气隙磁场定向的同步电机矢量控制系统,等等。

自控变频同步电机在其开发与发展的过程中采用过多种名称:(1)无换向器电机,(2)正弦波永磁同步电机,(3)梯形波永磁同步电机,又称无刷直流电机。常用的自控变频同步电机

调速系统有: (1) 梯形波永磁同步电机自控变频调速系统, 即无刷直流电机调速系统, (2) 正弦波永磁同步电机自控变频调速系统和按转子磁链定向的矢量控制系统, 等等。

为了使装置结构简单, 小容量无刷直流电机常用无位置传感器的自控式变频控制, 由电动势波形过零点产生换相信号, 低速时用他控变频启动。开关磁阻电机是一种结构非常简单的同步电机, 其控制系统也很简单, 如果能够从电机结构和控制方法上完全解决其转矩脉动和噪声问题, 开关磁阻电机的调速系统将有非常美好的发展前景。

参考文献

- [1] 陈伯时: 电力拖动自动控制系统——运动控制系统 (第3版), 机械工业出版社, 将于2003年出版。
- [2] Leonhard, W.: Control of Electrical Drives (3rd ed.), Springer-Verlag, 2001
- [3] 王兆安、黄俊: 电力电子技术 (第4版), 机械工业出版社, 2000
- [4] 冯培悌: 计算机控制技术, 浙江大学出版社, 1990
- [5] 苏彦民: 电力拖动系统的微型计算机控制, 西安交通大学出版社, 1988
- [6] 吴坚、赵英凯、黄玉清: 计算机控制系统, 武汉理工大学出版社, 2002
- [7] Bose, B.K.: Power Electronics and Variable Frequency Drives, Technology and Applications, IEEE, 1997 ;
姜建国等译: 电力电子学与变频传动 技术和应用, 中国矿业大学出版社, 1999
- [8] 陈伯时、谢鸿鸣: 交流传动系统的控制策略, 电工技术学报, 2000 (5)
- [9] Taylor, D.G.: Nonlinear Control of Electric Machines: An Overview, IEEE Control System, 1994(12)
- [10] 陈伯时、徐荫定: 电流滞环控制 PWM 逆变器-异步电机的非线性解耦控制系统, 自动化学报, 1994 (1)
- [11] 陈伯时、冯晓刚等: 电气传动系统的智能控制, 电气传动, 1997 (1)

托卡马克装置电源系统

季幼章 (中国科学院等离子体物理研究所)

1、引言

聚变核反应是一种非常理想的潜在新能源,近年来,磁约束聚变在托卡马克类型的装置上取得了突破性的进展,从而开发聚变能的科学可行性终于在托卡马克上得到了证实。正因为此,一个国际热核聚变工程实验堆(ITER)正在进行工程设计,其聚变输出功率可达 1500 兆瓦。

HT-7U 超导托卡马克是国家“九五”大科学工程,它是一个具有非圆截面的大型超导托卡马克装置。纵场电源是一个大容量高稳定度全控整流电源,极向场电源满足建立等离子体和感应加热所要求的磁通变化及波形要求,并实现对等离子体电流、位移、形状和电流分布等的控制。

2、核聚变与等离子体

质量数很小的两个适当的原子核在一定条件下重新组合成一个质量数较大的原子核,会释放出能量,这就是人类利用核能的另一重要途径即核聚变的理论依据。

1929 年,有人提出太阳中产生能量的过程就是质子的聚变反应。这些反应能在温度高达 $15 \times 10^6 \text{K}$ 的太阳中心发生。

2.1 聚变反应

聚变反应所需的原料直接或间接地都是氘核(D)。单位质量的氘聚变所放出的能量是单位质量 ^{235}U 裂变所放出能量的 4 倍左右。这是聚变核反应作为一种潜在的新能源的突出优点之一。

核反应是在原子核的热运动中发生的,所以称为热核反应,如果这种反应能够加以控制,则称为受控热核反应。计算得知温度达到 $10^8 \sim 10^9 \text{K}$ 就可以发生聚变反应。

要实现作为潜在能源的核聚变反应,只能通过高温等离子体的方法。在高温等离子体中氘核和电子处在几乎相同的高温状态中。而且,在等离子体中,氘核与电子作无规热运动,互相不断地碰撞着。因此,可以说高温等离子体物理学是核聚变的理论基础。

2.2 聚变能量得失相当的劳逊判据

作为一种能源的核聚变反应堆,不仅要求等离子体的温度必须高到使离子能够克服彼此之间的库伦斥力而相互碰撞发生聚变反应,并且要求从等离子体发生聚变反应中释放的能量必须大于用以产生和维持高温等离子体所需的能量。

劳逊作了核聚变等离子体中的能量平衡计算,设等离子体的密度为 n ,加热到温度 T ,该高温等离子体维持时间为 τ 。对于氘-氘(D-T)反应,当等离子体温度为 10keV 时,实现能量收支平衡的 $n\tau$ 值是 $10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$,如果实验上达到了劳逊判据要求的参考值,那就证明了核聚变的科学可行性。当 $T=30 \text{keV}$ 时, $n\tau$ 大约为 $1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$,达到了热核点火条件。