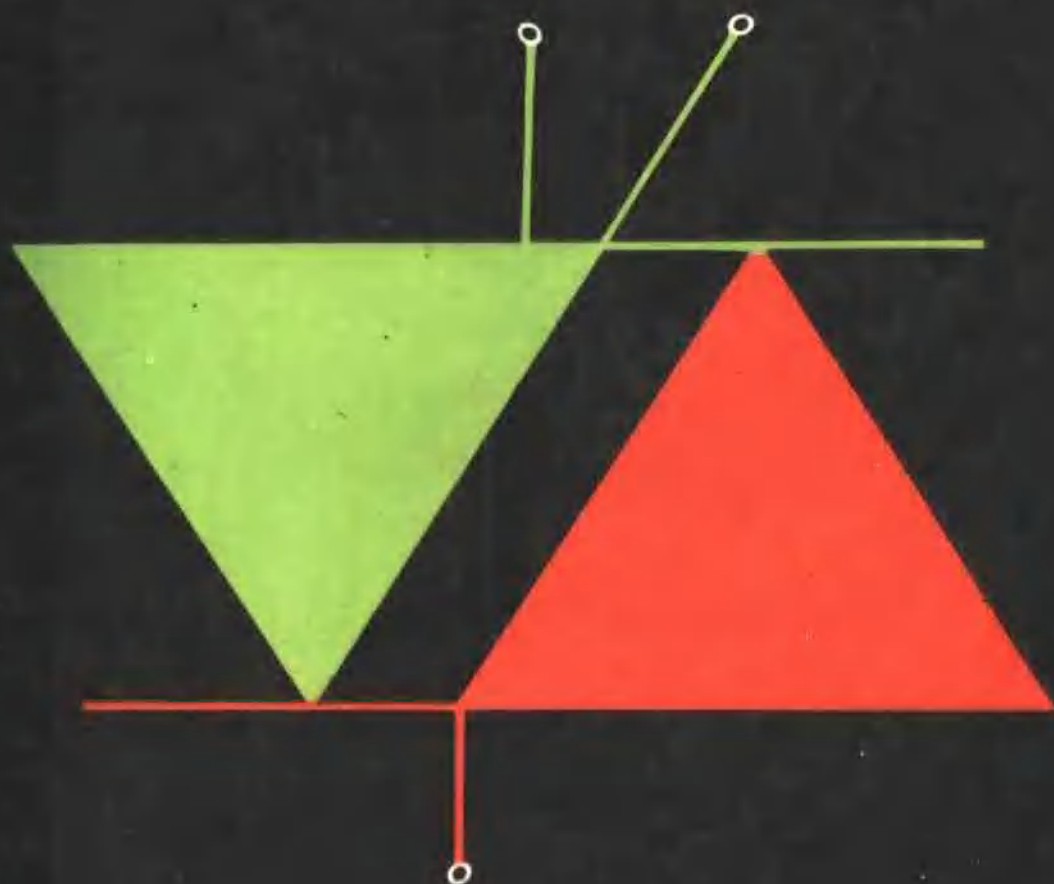


电力电路原理与设计

张守国 主 编
崔福润 江敦佐 副主编



大连理工大学出版社

电力电子电路原理与设计

主 编 张守国
副主编 崔福润 江敦佐

大连理工大学出版社

(辽)新登字16号

内 容 提 要

本书介绍了电力电子电路中常用的元件特性、参数以及可控整流电路、有源逆变电路、各种保护电路的工作原理、波形分析方法。并把电路原理与工程设计方法紧密结合,对各种电路的元件参数选择与计算结合实例加以说明。针对电力电子电路采用相位控制的特点,本书对相位配合的分析与设计步骤做了详细地系统地阐述。

本书可以作为大专院校工业自动化专业及应用电子技术专业师生的教材或参考书,也可供从事电力电子装置的设计、安装、调试的工程技术人员参考。

电力电子电路原理与设计

Dianlidianzi Dianluyuanli Yu Sheji

张守国 主编

大连理工大学出版社出版发行 (邮政编码: 116024)

大连理工大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 16 字数: 404千字

1993年2月第1版

1993年2月第1次印刷

印数: 1—1500册

责任编辑: 于明珍

责任校对: 陈军

封面设计: 姜严军

ISBN 7-5611-0655-6/TN·9

定价: 4.50元

前 言

大功率晶闸管变流装置是一种新型的变流装置,由于其技术经济指标较好,特别是在节能方面具有明显效益,在国内外已得到广泛应用。实用的大功率晶闸管变流装置是由各种基本的晶闸管电力电子电路组成。本书系统地介绍各种基本电路的工作原理、控制方法、设计计算以及它们的技术经济指标。

电力电子电路是工业电气自动化专业和应用电子技术专业的专业基础课。本书是作为这两个专业学生的教材编写的,也可作为从事这方面工作的专业技术人员参考。按教育计划规定,该课程的教学时数为60学时,考虑到大部分院校均只讲授其中比较主要的基础部分,本书将分两部分出版。第一部分为本科学生必须讲授的内容,共分六章:第一章晶闸管元件、第二章单相可控整流电路、第三章三相可控整流电路、第四章触发电路、第五章有源逆变电路、第六章保护电路。第二部分作为选修课内容:包括无源逆变电路、交流开关与交流调压、斩波器等。

本书第一、四章由江敦佐副教授编写,第五、六章由崔福润副教授编写,其余由张守国副教授编写。全书由周武禄教授审稿,在审稿过程中进行了细致的审查、修改,提出了很多非常宝贵的意见,在此谨致以衷心的感谢。

由于我们的学识有限以及编写时间仓促,错误之处在所难免,敬请使用本教材的师生和其它读者指正并提出修改意见。

编 者

1992.2月

目 录

12-13 六

4703502

绪 论	(1)
第一章 晶闸管	(72)
第一节 晶闸管的结构和工作原理	结构 种类 导通条件 (7)
第二节 晶闸管的基本特性	(12)
第三节 晶闸管的主要参数	计算 (额定平均电流) 温度 容量 (16)
第四节 特殊晶闸管简介	晶闸管 (26)
思考题与习题	(40)
第二章 单相可控整流电路	(42)
第一节 单相半波可控整流电路	整流电路 工作原理 波形 计算法 简单计算 (42)
第二节 单相全控桥式整流电路	整流电路 反电动势 机械特性 例题 稳态 (52)
第三节 单相半控桥式整流电路	电阻 电感 续 (69)
习 题	(82)
第三章 三相可控整流电路	(84)
第一节 三相半波可控整流电路	波形 系列 计算 (84)
第二节 三相全控桥式整流电路	(99)
第三节 三相半控桥式整流电路	续 波形图 (116)
第四节 变压器漏抗对整流电路的影响	(130)
第五节 带平衡电抗器的双反星形整流电路	(135)
第六节 多相整流电路	(146)
第七节 主电路元件及变压器参数选择的说明	(154)
习 题	(158)
第四章 晶闸管的触发电路	同步 续 (161)
第一节 对触发电路的要求	(161)
第二节 单结晶体管移相触发电路	有源逆变 工作原理 (162)
第三节 同步信号为锯齿波的触发电路	三相整流 工作原理 (175)
第四节 同步信号为正弦波的触发电路	(185)
思考题与习题	(194)
第五章 晶闸管有源逆变电路	(196)
第一节 概述	(196)
第二节 三相零式反并联可逆电路的工作原理及其控制方法	续 元件 (196)
第三节 三相零式反并联可逆电路的工作状态的分析	(202)
第四节 三相零式反并联可逆电路的环流问题	触发电路 与主电路同步 (204)
第五节 逆变角和对最小逆变角的限制	续 计算 (205)
第六节 逆变失败的原因和防止的措施	(207)

第七节	三相全控桥式反并联可逆电路的工作原理.....	(209)
第八节	三相桥式反并联可逆电路工作状态的分析.....	(211)
第九节	逆变工作状态下的电动机机械特性.....	(213)
第十节	三相桥式反并联可逆电路的环流问题.....	(215)
第十一节	无环流可逆电路的基本概念.....	(218)
第十二节	有源逆变在其它方面的应用举例.....	(219)
第十三节	改善变流装置的功率因数问题.....	(221)
	习题及思考题.....	(226)
第六章	晶闸管的串、并联及保护电路.....	(227)
第一节	晶闸管的串联和并联.....	(227)
第二节	晶闸管的保护.....	(232)

绪 论

电是工业、农业、国防和科学技术等领域使用的一种主要能源形式，它输送方便，传输效率高，便于管理，容易实现自动控制。每个国家的电力系统均采用工频的正弦交流电的形式输送给用电部门，而每个用电设备的要求需要有直流、各种不同频率的交流以及脉冲电源等各种形式的电能，因而就存在一个各种不同形式的电能的相互转换的问题。早期采用直流发电机组、变频机组等实现这种变换。随后由于汞弧整流器、闸流管、引燃管等离子器件的出现，采用水银整流器来实现。到1956年美国的贝尔电话实验室首先研制出可控的电力半导体器件的雏型，接着1957年GE公司生产出产品，并将它应用于电力技术领域。当时所采用的名称是可控整流器件“SILICON CONTROLLED RECTIFIER”，通常简称可控硅。从此，半导体技术开始进入了大功率领域，并逐步形成了介于电气工程三大领域——电力、电子和控制技术之间的边缘学科，称为电力电子学科。目前国际，国内均有专门的电力电子学会从事促进该学科发展的工作。

由于电力电子电路具有体积小、重量轻、可靠性好、维修方便、寿命长、抗振抗冲击性能好等优点，并且有良好的技术经济指标，又有很好的节能效果，因而现已逐步取代其它两种变流方式。如英国在70年代初，在直流传动中已有95%采用可控整流器供电，瑞典通用电气公司到1975年已有90%以上的直流传动采用这种供电设备，其它各发达国家也大致如此。上述三种供电方式的技术经济指标列于表0-1。

表 0-1

供电方式	传动效率	响应时间 (秒)	功率放大倍数
变流机组	0.79	1	10
水银整流器	0.84	10^{-3}	10^3
可控硅整流器	0.89	10^{-4}	10^3

国际电工技术委员会(IEC)于60年代初召开了会议，确定了用“THYRISTOR”(晶闸管)这一名称代表具有三个以上PN结、并具有通断两种稳定工作状态伏安特性的半导体器件。它是一个总称，包括上述的可控硅(称为普通晶闸管)和各种特殊的晶闸管。

由于它的控制功率小，开关速度快，又便于把以微机为代表的微电子技术用于变流装置的控制领域，从而使系统具有控制、监测、保护、自诊断及自动复位等多种功能，为实现更完善的自动化创造了有利条件。美国GE公司在80年代初就发展成以微机为基础的控制单元。

一、器件的发展是推动变流技术发展的前导

从上面简要介绍可知，往往由于器件的发展促进了变流技术的发展。目前电力半导体器件已成为主导，随着电力电子学科的迅速发展，已出现了数十种电力半导体器件，它们的共同特点是功率较大，它包括各种晶闸管，功率晶体管以及功率二极管。此外由于学科

发展的需要，也常把一些用于电力半导体器件触发和保护用的功率较小的器件及集成组件组成的控制电路归于电力电子电路中研究。

属于晶闸管类型的器件有普通晶闸管 (SCR)；双向对称型晶闸管，如双向晶闸管 (TRIAC)；快速型晶闸管，如普通快速晶闸管、可关断晶闸管 (GTO)、门极辅助关断晶闸管 (GATT)、场控晶闸管 (FCT) 或称静态感应晶闸管 (SITH)；双向不对称型晶闸管 (ASCR)；特殊触发型晶闸管，如光控晶闸管 (LASCR)，温控晶闸管；以及晶闸管模块。功率晶体管包括双极型功率晶体管，功率 MOS 场效应管，静电感应晶体管 (SIT) 以及晶体管模块等。属于触发和保护用器件如单结晶体管、等效单结管、硅单向开关，硅双向开关，集成触发器等百余种。

目前世界各国有数百家大企业、公司生产和研制各种电力半导体器件，总的趋势是向着大功率、快速、组件化和降低成本的方向发展。目前，各种电力半导体器件国外的研制水平如表 0-2 所列。

表 0-2

普通整流管	6000 安, 3000 伏	不对称晶闸管	1000 安, 2500 伏
快速整流管	2500 安, 3000 伏, 300 毫微秒	逆导晶闸管	1000 安, 2500 伏, 30 微秒
普通晶闸管	3500 安, 6500 伏 4000 安, 5000 伏	静电感应晶闸管	2200 安, 4000 伏
晶闸管模块	160 安, 2500 伏	光控晶闸管	3000 安, 4000 伏 1500 安, 8000 伏
双向晶闸管	1000 安, 1200 伏	功率晶体管	400 安, 1000 伏 800 安, 500 伏
快速晶闸管	1000 安, 2500 伏, 30 微秒 2000 安, 1200 伏, 10 微秒	功率晶体管模块	300 安, 1200 伏 80 安, 1400 伏
可关断晶闸管	3000 安, 4500 伏	功率 MOS 场效应管	50 安, 1000 伏
门极辅助关断晶闸管	400 安, 1200 伏, 4 微秒 500 安, 2500 伏, 20 微秒	静电感应晶体管	60 安, 800 伏

在晶闸管类器件中，可关断晶闸管具有更大的发展前景。这是因为它可以利用在它本身的控制极加入控制信号使其关断，因而由它组成的电路可以省去强迫换流环节，且开关时间短，这对无源逆变电路、斩波回路来说有特别重要意义，可以使电路简化，并能提高开关频率。近年来光控晶闸管也发展较快，它能使控制电路与变流器主电路隔离，以满足高压设备的要求，因此特别适用于高压直流输电，静止型无功功率补偿以及核聚变电源等。

另一个值得重视的动向是功率晶体管的发展十分迅速，而且已进入实用阶段。有人预计今后中小功率的变流器将全部晶体管化。但从它的可靠工作区和集电极饱和压降来看，1000 伏电压已是上限了，因此尚不能完全代替可关断晶闸管。

功率 MOS 场效应管属于电压控制器件，它的输入阻抗大，电流放大倍数可达 $10^6 \sim 10^7$ 。由于器件内的电流仅由多数载流子形成，因而没有固有的开关延迟时间和存储时间，它的开关速度比双极型晶体管还要快 1~2 个数量级，所以更适合于高频逆变电路和斩波器。但是它的通态阻值较高，400 伏至 1000 伏的器件分别可达 1.5~3.5 欧姆，所以目前只能用于 1000 伏、50 安以下低功率范围。当前人们又考虑把具有快速、高输入阻抗的功率 MOS 场效应管和具有低饱和压降、电流定额大的双极型功率晶体管组合起来，即输入器件采用前

者，而输出器件采用后者的新型组合器件，称为 BIPMOSFET。

图 0-1 是 M·S·ADLER 等所预测的到 90 年代各种电力半导体器件在功率与频率方面的适用范围。

我国于 1960 年制成硅整流管、1962 年制成普通晶闸管以来，晶闸管和硅整流管的生产技术有了很大发展，形成了一支比较大的器件生产队伍，产量大幅度上升，元件质量也有较大的提高，能够批量生产 3000 伏、1000 安以下的普通晶闸管。各种派生的晶闸管，如普通快速、双向、可关断、逆导型晶闸管，无论从品种或数量都有了较快的发展。数十安培的达林顿功率晶体管也试制成功。半导体器件研究、设计和制造工艺是现代科学技术的综合成就，其技术改造在我国已有很大发展，随着计算机技术的应用，将促使我国在元件生产和研制上更快地缩短与国外先进水平的差距。

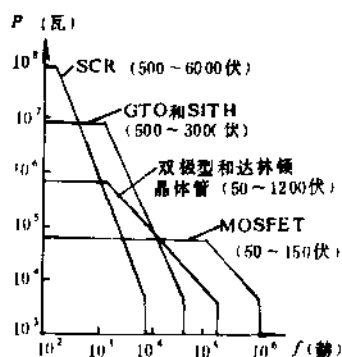


图 0-1

二、电力电子电路及应用

电力电子电路根据电能转换的形式，大体可以分成以下几种类型：

1. 整流电路：将交流电能转换为直流电能的电力顺变过程称为整流，完成这一功能的电路称为整流电路。它有可控与不可控整流两类。

2. 逆变电路：将直流电能转换为交流电能的电力逆变过程称为逆变。完成这一功能的电路称为逆变电路。如果交流侧与交流电网相联，由直流电能转换而来的交流电能回馈给电网，则称为有源逆变；若交流侧与负载相联，由直流电能转换而来的交流电能直接供电给负载，则称为无源逆变。

3. 周波变换器：将一种频率的交流电能（一般为工频电源）直接变为其它频率的交流电能称为周波变换器。它是一种变频器，又称为它为交-交直接变频器。如果把交流先经过整流变为直流再逆变成不同频率的交流，则称为交-直-交间接变频器。

4. 交流调压与交流开关：如果将晶闸管构成的电路只作为交流电源的无触点开关用，而不改变电源的种类和参数，则称为交流开关，或静止开关。若改变电源电压而不改变其频率，则称为交流调压。如果利用零电流开关，使加在负载上的电源仍为完整的周波，通过开关只控制其通断周波比，则称为调功器。

5. 斩波电路：它是利用晶闸管做为直流开关。通常把具有快速、高频率地控制接通和切断动作功能的装置称为斩波器，其中实现对主电路接通、切断的部分称为斩波电路。斩波器的功能是：（1）变换直流电压；（2）变换负载阻抗；（3）将直流电压脉冲化，得到一种脉冲电源。将晶闸管串接于直流电源中，改变其通断比，就能使负载两端电压平均值近似从零连续变到电网额定电压。变换阻抗就是将斩波器与固定阻抗并联，改变斩波器通断比就可得到连续可调的阻抗。

由于晶闸管本身的突出优点，因而由它构成的上述各种电路及装置也具有比用变流机组和水银整流器来实现变流的方法有明显的优越性。因而在工业、农业、国防以及各种科学研究领域都得到广泛的应用，特别在节能方面有显著成效，对国民经济发展有着十分重要的意义。

下面仅就应用比较广泛的领域加以简要介绍：

1. 可控整流电源：它广泛用于高压静电装置，电解、电镀等各种电加工电源，蓄电池快速充电装置以及各种成套的直流电机调速装置。国外在这些领域几乎全部采用晶闸管可控整流电路供电。由于技术上比较成熟，1000 千瓦以下的中小功率电源已在冶金、矿山、造纸、纺织、印染、制糖等部门得到广泛应用。1977 年全国中小功率晶闸管拖动装置的统一设计其规格如表 0-3 所示。

表 0-3

功率范围 (千瓦)	电路形式	输出电流 (安)	输出电压 (伏)	进线电压 (伏)	冷却方式
0.4~4	单相全控桥 (不可逆)	5, 10	110, 160	单相 220	自冷
0.4~4	单相全控桥 (有环流可逆)		160	单相 220	自冷
5.0~200	三相全控桥 (不可逆)		220, 440	三相 380	50, 80
5.5~200	三相全控桥 (无环流可逆)		220, 440		100 自冷
5.5~200	三相全控桥 (有环流可逆)		220, 440		其它风冷

上述系统可广泛适用于一般拖动系统，对于工作条件恶劣、过电流倍数大于 2.5 倍额定电流时，则需按具体情况另外设计，随后又组织了 7000 千瓦以下大功率晶闸管直流调速装置的全国联合设计。这些系列装置对提高“三化”水平和推广应用起了积极作用。目前大功率的调速装置已在不少工业中运行，如济南钢厂 750 初轧机主传动系统（容量为 2800 千瓦）等，运行良好，经济效果显著，每年可省电费 13.5 万元，提高效率 10%。在这方面和国外相比尚有较大差距，主要表现在：（1）单机容量小，西门子公司 1978 年制成了 11 540 千瓦的直传动系统；（2）元件定额低，因而单位面积安装容量小；（3）控制电路多为分立元件和小规模集成电路；（4）机组供电方式仍占主要地位。

2. 晶闸管斩波调速：矿山机车、地铁车辆、城市电车等直流供电的交通运输用牵引车辆的电源，一般均已用硅整流装置代替水银整流器。包括由蓄电池供电的电瓶车在内，在调速方法上采用斩波调速代替原来的电枢回路串电阻及改变几台电机电枢串并联接线方式的方法，已取得显著效果，并得到越来越广泛的应用。如地铁电机车 4×76 千瓦、750 伏电机，采用逆导型晶闸管斩波调速，无论在牵引或再生制动状态运行时，均能达到性能稳定。地铁站距短，起制动频繁的情况下，可节电 30% 以上，且起制动快。从而可以免除由于电阻耗能、散热而引起环境温度升高、妨碍乘客健康的问题。在这方面差距主要表现在高参数的逆导型晶闸管太少，限制了在大功率的电力机车上推广应用。国外仅日本近 10 多年以来先后建成采用斩波调速的电力牵引机车的铁路干线 20 余条，斩波器单台容量在 2500 千瓦以上。在节能与改善机车调速性能上均取得了很好的效果。

3. 晶闸管中频电源：它是一种采用负载谐振式换流的无源逆变器，将三相工频电源整流变为直流再逆变成单相交流电源。它输出的中频电源给感应加热器。这种加热方法被广泛应用于熔炼、钎焊、透热、淬火、烧结、弯管等工艺中。在这些工艺中均应用集肤效应的原理，特别是在热处理工艺中，只需工件表面加热，因而提高频率对节能与提高加工质量有着十分重要的意义。我国现在采用的中频熔炼炉电源有 1 千赫芝和 2.5 千赫芝两种，功率为几十千瓦；透热用频率大多为上述两种，功率为几百千瓦；淬火用中频电源频率为 2.5

~8 千赫芝, 功率为几百千瓦。国外目前已能生产单台 2500 千瓦、多台并联机组达 10 000 千瓦的中频电源和最高频率达 11 千赫芝、250 千瓦; 50 千赫芝、50 千瓦的中频电源。

4. 交流开关与交流调压器, 它们可代替常规的接触器与感应调压器, 对于减少事故维修、延长寿命、提高设备运行可靠性和产品质量有明显效果, 可广泛应用于调温、调光设备中。对于容量小、起制动频繁、可靠性要求较高的异步电机的正反转及调速控制中应用交流开关与交流调压也是适宜的。近年来在家用电器和用于工业控制上的计算机的输出电路中得到了广泛应用, 这主要是由于它线路简单, 工作可靠。

5. 交流调速系统: 尽管到目前为止, 在调速传动领域, 直流传动仍占主导地位。但直流电机由于存在机械换向问题, 使其最高供电电压受到限制, 国外目前也只做到 1200 伏, 相应的单机容量也只有 11 540 千瓦。而交流电机的供电电压则很容易做到 10 千伏或更高。此外在有腐蚀性、易爆炸等特殊环境中, 更具有其独特的优点。不仅如此, 与直流电动机相比, 交流电动机具有体积小、重量轻、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠以及易于维修等优点。因此从 30 年代起, 各国都在研究各种交流调速方案, 以求在调速性能上能与直流传动相媲美。自从晶闸管问世以来, 以及相应的电子控制器件、特别是微机的出现, 给交流传动的发展提供了基础。目前国外在无换向器电机、笼型异步电机的矢量控制、绕线型异步电机的串级调速以及 PWM 等技术上都有了重大突破和发展, 并进入工业应用阶段。此外由于世界性的能源危机, “节能型”交流传动技术得到了普遍重视。其重点放在工业中大量应用的风机、泵类设备, 这是由于它们的总容量约为工业总用电量的一半。而其传统的电气传动方式是采用交流电机恒速运转, 然后用挡板之类的机械方法, 对流量、压力等进行调节, 这种方式大量浪费了电能。由于这类负载耗电量与转速三次方成正比, 改用晶闸管串级调速方法调节转速, 以实现对流量、压力的调节, 节能效果十分显著。上海吴淞水泥厂 550 千瓦水泵改用串级调速后, 根据 1982 年两个月的统计数据, 全年可节电 90 万度。

变频调速是一种理想的四象限运行、高效率的交流调速方法, 调速性能指标完全可以与直流调速媲美。国外生产的用于变频调速的变频装置容量已达 10 000 千瓦。变频装置采用的是交-直-交逆变器, 线路比较复杂, 成本高, 限制了它的广泛应用。不过随着电子技术和计算机技术的发展, 特别是电力电子技术的发展, 这些问题将会得到比较圆满的解决。国内已研制了一些系统, 运行良好。此外, 目前大连电机厂已由日本引进了带微机控制的 TOSVERT-130G₁ 变频装置生产线, 可以供应 5.5~200 千瓦的成套装置, 已在风机、泵类以及搅拌机械等调速系统上应用, 性能良好, 并取得了很好的节能效果, 预视着在这一领域今后将有较快的进展。

70 年代迅速发展起来的无换向器电机, 是一台同步电动机和一组无源逆变器组成, 它实质上是一种自控式同步电动机的变频调速系统。具有良好的调速性能, 成本比通常的变频调速系统低得多, 其缺点是旋转磁场呈步进状态, 转矩脉动大, 过载能力差。此外还有超同步串级调速、矢量控制的交流调速系统等均已有了正式系列产品, 进入商品实用阶段。如东芝公司已把矢量控制的 1800 千瓦的交流调速系统用于可逆轧机的主传动系统中。富士公司的 STANIC-C 系列转子回路斩波控制的调速系统容量可达 280 千瓦。在这些领域, 近年来国内许多单位进行了大量的试验研究工作, 取得了很大的进展。

6. 其它应用: 对于跨越海峡以及具有大量高层建筑的现代化城市等场合, 采用地下高压直流输电是必由之路, 它将可以大大降低对电缆绝缘等级的要求, 从而降低设备投资。国

外已在广泛应用。国内已建造从宁波到舟山的高压直流输电工程。

不间断电源装置和高压直流输电一样，都是把工频交流电能变成直流再逆变成工频交流的变流装置。它应用于要求不能间断供电的重要部门和设备上。如大中型计算机、卫星地面站、通讯中心、医院手术室等，还有一些自动化程度较高的大型电站、化工、石油工厂等。在供电电网故障时，要有不间断供电的电源。电网故障时将由平时处于浮充状态的蓄电池做为逆变器的电源，也可以用柴油机发电机组发电代替交流电网供电。这些部门正在越来越广泛的采用不间断电源，简称 UPS。

第一章 晶 闸 管

内部由三个以上PN结组成,主电压、电流特性至少在一个象限里有通、断两个稳定状态,并能从断态转为通态,或实现其相反转换的半导体器件总称为晶体闸流管,通常简称为晶闸管。晶闸管包括普通晶闸管和特殊晶闸管。普通晶闸管又称为可控硅整流元件,简称可控硅。特殊晶闸管包括双向晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管、快速晶闸管、光控晶闸管、温控晶闸管、磁控晶闸管等。由于普通晶闸管被大量和广泛地使用于交通、冶金、矿山、电力、煤炭、石油化工等技术领域,因此,通常所说的晶闸管往往就是指普通晶闸管而言的。本书所讲述的内容是以普通晶闸管为主,至于特殊晶闸管,仅做概括性的介绍。

第一节 晶闸管的结构和工作原理

一、晶闸管的种类

根据外形,晶闸管分为螺栓式和平板式两种型式,分别于图1-1中(a), (b)所示。晶闸管是一个四层三端的半导体器件,它有三个电极:阳极A、阴极K,控制极(亦称门极)G,它的表示符号如图1-1(c)所示。

晶闸管是一个大功率半导体器件,它在工作过程中PN结的电流密度很大,所产生的热量也很大,但是由于PN结的体积小,热容量小,又处于完全密封的状态,热量不易散出,因此,它的冷却是一个极为重要的问题。在使用晶闸管时,必须遵守晶闸管规定的冷却条件,以防超出PN结的额定结温,导致元件损坏。晶闸管元件均采用冷却器来散热。根据冷却介质的不同,常用的冷却器有两种,即空气冷却器(散热器)和液体冷却器,如图1-2所示。图(a)、(b)为螺栓型元件的空气冷却器,图(c)为平板型元件的空气冷却器,图(d)为螺栓型元件的液体冷却器,图(e)为平板型元件的液体冷却器。

对于螺栓式晶闸管来说,螺栓是晶闸管的阳极A;粗辫子线是晶闸管的阴极K;细辫子线是晶闸管的控制(门)极G。螺栓式晶闸管在安装和更换时比较方便,但仅有螺栓与冷却器相接触,因为接触面积较小,所以冷却效果比较差,因此,这种结构仅用于电流为200安培以下的情况。

平板式晶闸管的细辫子线是控制极G,靠近控制极一侧的平面是阴极K;另一侧平面是阳极A。在使用时,用两个互相绝缘的冷却器将晶闸管紧紧地夹在中间。由于平板式晶闸管

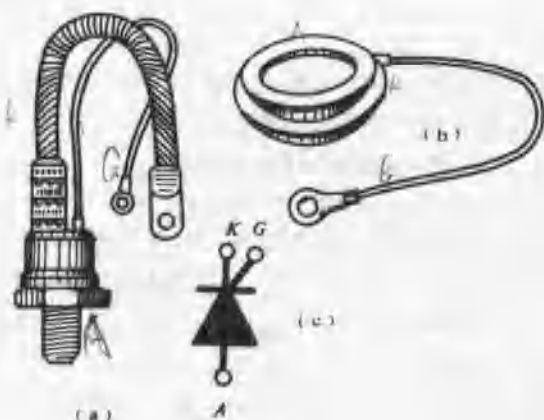


图 1-1

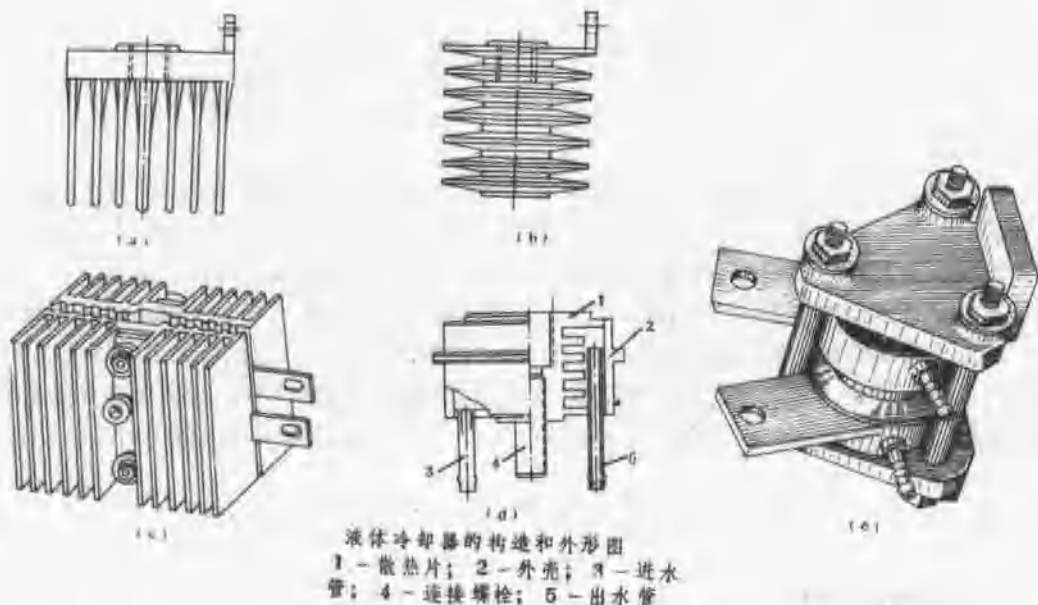


图 1-2

与冷却器相接触的面积大, 所以冷却效果较好, 但在安装和更换时比较麻烦。200 安培以上的晶闸管均采用平板型散热器。

二、晶闸管的结构和工作原理

晶闸管在工作时, 它的阳极与阴极和电源、负载相接, 组成主电路; 它的控制极与晶闸管的控制装置相连, 组成控制电路。

(一) 为了讨论晶闸管的导通条件, 现按图 1-3 所示电路进行实验。主电路用灯泡作为负载; 控制回路中的 $+E_g$ 作为晶闸管的触发信号。

实验过程如下: 主电源 E_a 的正端经负载——灯泡接于晶闸管的阳极 A , 其阴极 K 接于 E_a 的负端, 此回路称为晶闸管的主回路, 又称为主电路。晶闸管的阳极 A 接于 E_a 的正端, 称为正向阳极电压如图 1-3 (a) 所示; 如果接在 E_a 的负端, 则称为反向阳极电压如图 1-3 (e)、(f) 所示。控制回路中, 控制极 G 接于 E_g 的正端, 阴极 K 接于其负端, 称为正向控制极电压信号, 如图 1-3 (a) 所示; 否则就称为反向控制极电压如图 1-3 (g)、(h) 所示。

如图 1-3 (a) 所示, 将晶闸管的阳极 A 经负载接于电源 E_a 的正端, 阴极 K 接于其负端而控制极 G 为开路时, 灯不会亮, 这说明晶闸管并未导通。

此时, 如将开关 K 合上, 即加上正向控制极电压, 灯立刻就亮, 这说明晶闸管已经导通, 如图 1-3 (b) 所示。

晶闸管导通后, 如果再去掉正向控制极电压, 灯仍然亮着, 如图 1-3 (c) 所示, 说明晶闸管并未受其影响, 还继续导通。在晶闸管导通以后, 即使在控制回路中加上反向控制极电压, 灯也不灭, 如图 1-3 (d) 所示, 说明晶闸管仍然处于导通状态。

从以上观察到的现象可以得知, 晶闸管在已有正向阳极电压作用的条件下, 为了使其导通, 应该在控制极与阴极之间再加上一个功率足够的正向电压。但是, 晶闸管一旦导通, 控制极就失去了控制作用, 甚至加上反向控制极电压, 都不可能使它恢复阻断状态。

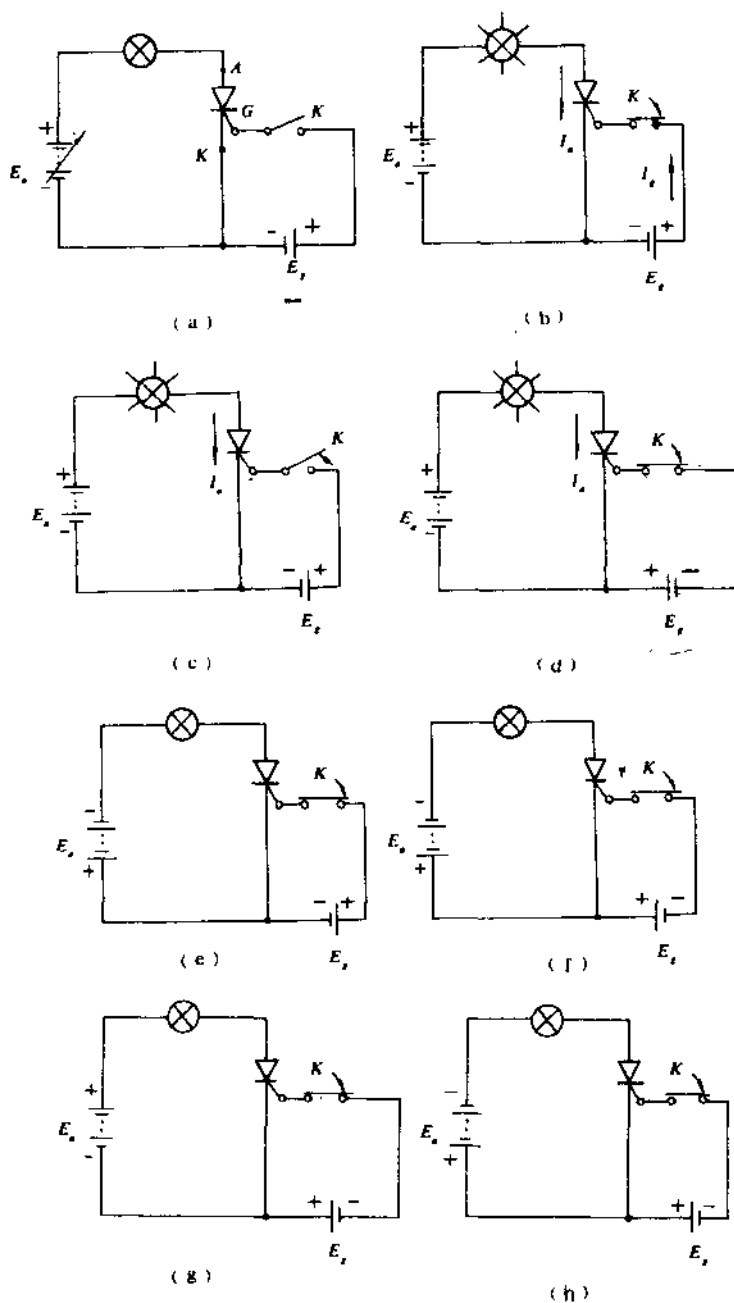


图 1-3

要想关断导能着的晶闸管，可以逐渐降低主电源电压 E_s 或逐渐增加主电路中的电阻，这样主电路中的电流 I_a 就逐渐降低，当它降低到某一数值（约为几十毫安）以下时，晶闸管就关断了。这个能保持晶闸管导通的最小电流称为维持电流 I_H ，即 $I_a < I_H$ 时，晶闸管关断。

如果晶闸管是处在反向阳极电压作用之下，则不论控制极上加的是正向电压还是反向电压，晶闸管都不会导通，当然灯也不亮，如图 1-3 (e)、(h) 所示。

若加到控制极上的是反向控制极电压，则主回路不论加的是正向阳极电压还是反向阳极电压，晶闸管均不导通，灯也不亮如图 1-3 (g)、(h) 所示。

综合上述实验现象，可以得出如下三点结论：

1. 晶闸管导通的条件：必须有正向阳极电压 ($+U_a$) 和正向控制极电压 ($+U_g$)，同时分别作用于 A, K 之间和 G, K 之间。

2. 普通晶闸管具有自保持特性，它一旦导通，其控制极就失去了控制作用，只要 $I_a > I_H$ ，就一直处于导通状态。为了减少控制极的损耗，正向控制极电压可以用正向脉冲信号代替，通常称为正向触发脉冲。但是在触发脉冲存在的期间内，只有 $I_a \geq I_L$ ，晶闸管才能继续导通，这里的 I_L 叫做晶闸管的掣住电流，它表示为使晶闸管由阻断状态变为导通状态所需要的最小主电流。

3. 晶闸管关断的实质是： $I_a < I_H$ 。

在实验过程中，之所以能产生上述各种现象是由晶闸管元件的内部结构及其特有的性能所决定的。

(二) 晶闸管的结构和工作原理

螺栓型和平板型晶闸管的内部结构如图 1-4 和图 1-5 所示。这两种型号的晶闸管管芯基本相同，只是平板型的控制极在中间。下面以螺栓型管芯的结构为例加以说明。如图 1-6 所示，在 N 型硅基体两面扩散铝 (P 型杂质)，制做 P 型层，从而形成 PNP 结构。然后在其中一面的大部分区域里放置金铂合金箔 (N 型杂质) 做阴极；在同一面的另一小区域里放置金铂钽金属片做控制极。在其反面的整个面上放置铝 (P 型金属片) 做为阳极的欧姆接触，经过合金化热处理后，即形成 PNPN 四层结构。

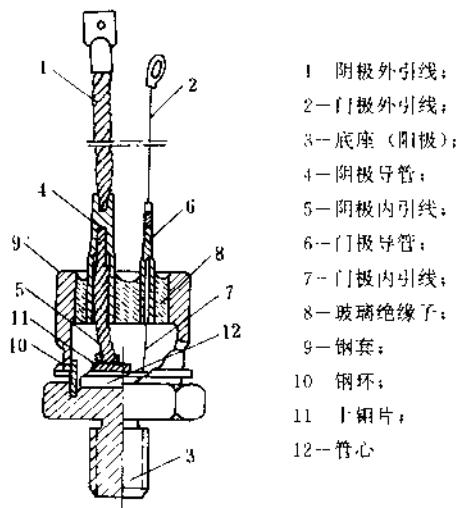


图 1-4 螺旋形元件结构图

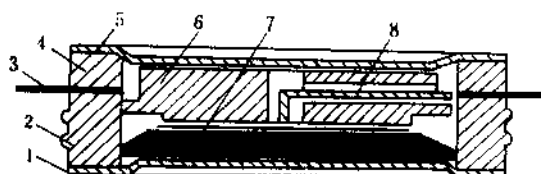


图 1-5 平板型元件结构图

1-下金属材料；2-下陶瓷件；3-门极金属件；4-上陶瓷件；
5-上金属材料；6-阴极铜压块；7-管心；8-门极内引线

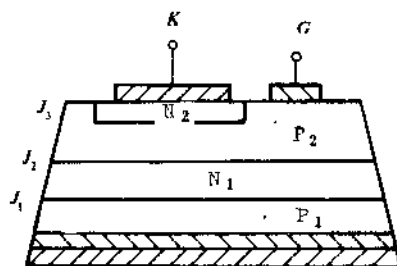


图 1-6

晶闸管的工作原理：晶闸管的内部结构为PNPN四层，它有 J_1, J_2, J_3 三个PN结，如图1-7(a)所示。若将中间的 N_1 和 P_2 分割为两部分，则晶闸管就可视为由一个PNP型三极管和另一个NPN型三极管构成的一对互补晶体三极管，如图1-7(b)、(c)所示。

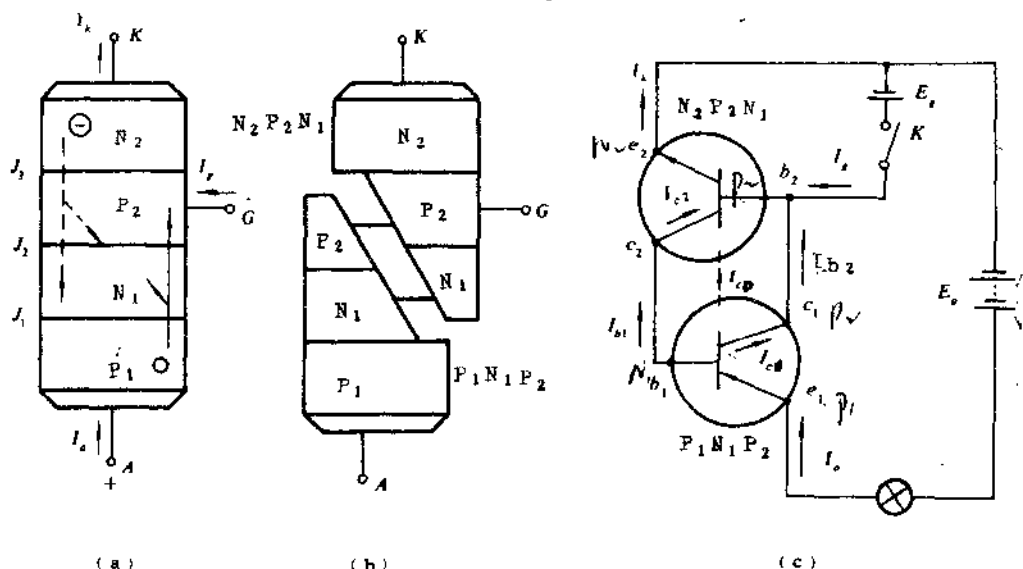


图 1-7

假设晶闸管的控制极上没有加任何电压，即 $U_g=0$ ，这时如果在阳极与阴极之间加正向阳极电压，PN结 J_2 处于反向偏置而起阻挡作用；如果加反向阳极电压，两个PN结 J_3 和 J_1 （主要是 J_1 ）都处于反向偏置而起阻挡作用。所以，当 $U_g=0$ 时，仅有阳极电压，晶闸管在两个方向上都不会导通，相当于一个处于断开状态的开关。

在晶闸管已经承受正向阳极电压的情况下，为了使其导通，就必须使处于反向偏置的 P_2N_1 结—— J_2 失去阻挡作用。由图1-7(a)已知，晶闸管阳极接电源正端后，就有空穴自 P_1 区通过 J_1 结流向 N_1 区。这些空穴一部分在 N_1 区复合掉，余下部分则到达 J_2 结作为 J_2 结的少数载流子。同理晶闸管的阴极接电源的负端后，就有电子自 N_2 通过 J_3 结流向 P_2 区。这些电子一部分在 P_2 区复合掉，余下的部分也到达 J_2 结，做为 J_2 结的少数载流子。于是， J_2 结两侧的少数载流子增加，反向电流增大，阻挡作用趋于消失。这时，再加上正向控制极电压，便产生正向控制极电流。由图1-7(c)可知，两个互补晶体三极管的集电极电流同时就是这两个三极管的基极电流。所以，在有了足够大的正向控制极电流之后， $N_2P_2N_1$ 三极管就要导通，而且其集电极电流就是 $P_1N_1P_2$ 三极管的基极电流，于是 $P_1N_1P_2$ 三极管将饱和导通，而 $P_1N_1P_2$ 三极管的集电极电流又是 $N_2P_2N_1$ 三极管的基极电流，它远大于控制极电流 I_g ，所以， $N_2P_2N_1$ 三极管也饱和导通，这一正反馈过程，就足以使晶闸管“饱和导通”，也就是晶闸管被触发导通。

设 $P_1N_1P_2$ 管和 $N_2P_2N_1$ 管的集电极电流分别为 I_{c1} 和 I_{c2} ，发射极电流分别为 $I_{e1}=I_a$ ，和 $I_{e2}=I_k$ ，它们的电流放大系数分别为

$$\alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_{e1}} = \frac{I_{c1}}{I_a}, \quad \alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_{e2}} = \frac{I_{c2}}{I_k}$$