



电力电子技术丛书

电力半导体电路原理

张永生 主编

机械工业出版社



DIANLI DIANZI JISHU CONGSHU

本书是《电力电子技术丛书》的一个分册。全书共分十一章。前三章为基础部分，从第四章起分别介绍以晶闸管（习称可控硅元件）为主的可控整流电路、逆变电路、变频电路、直流斩波电路、交流调压电路、保护和触发电路的基本工作原理、波形分析和参数计算方法。书中，对波形分析介绍得比较透彻，还对各类触发电路按新的分类方法作了较详尽的分析和介绍。本书将为读者阅读本丛书的其他各分册和从事电力电子技术工作打下必要的基础。

本书可供从事电力电子技术和工业自动化技术的人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电力半导体电路原理

张永生 主编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 16 3/4·字数 436 千字

1986年4月北京第一版 1986年4月北京第一次印刷

印数 0,001—5,400·定价 4.15 元

统一书号：15033·6145

出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀和脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

编委会成员

主任委员 顾廉楚

副主任委员 张明勋 苏文成 张为佐

陈守良 严蕊琪

委员 (按姓氏笔划序)

卡敬明 孙流芳 李佑持 沈来仪

张立 张永生 张铁忠 周胜宗

秦祖荫 徐传骧

前 言

本书是根据丛书的编写指导思想和读者对象，并按照丛书编委扩大会议所通过的编写提纲进行编写的。

本书对各种可控整流电路、逆变电路、变频电路、直流斩波电路、保护电路及触发电路均作了比较全面、详细的阐述，还采用新的触发电路分类方法，对各种类型触发电路作了详细的分析和介绍，本书可为读者阅读本丛书的其他各分册和从事电力电子技术工作打下必要的基础。

本书由陕西机械学院张永生副教授主编。全书共分十一章，其中第一章至第九章由张永生副教授编写；第十章由西安交通大学秦祖荫副教授编写；第十一章第一、三、四、六、七节由西安电力整流器厂赖钧镒工程师编写；第十一章第二、五节由西安电力整流器厂苗永兴工程师编写。

本书由哈尔滨工业大学赵昌颖副教授主审。书稿经1983年8月在西安召开的丛书审稿会议上审查通过。审稿会议的代表对书稿提出了许多宝贵的修改意见和建议，谨致以衷心的感谢。并对后列参考文献的作者以及提供许多资料的有关单位，也在此一并表示感谢。

由于我们的技术和业务水平都不高，以及编写时间仓促，错误在所难免，希望读者提出宝贵的批评和意见。

编者 一九八四年十一月

常用符号表

di/dt ——晶闸管通态电流临界上升率, 电流变化率

du/dt ——晶闸管断态电压临界上升率, 电压变化率

E ——直流电源电压, 电动机反电势, 能量

E_c ——临界转速时的反电势

E_M ——变压器分断时励磁电感中的初始电压

e ——电源电势的瞬时值

e_L ——电感的自感电势瞬时值

f_0 ——固有频率

I_1, i_1 ——变压器一次绕组线电流有效值与瞬时值

I_2, i_2 ——变压器二次绕组线电流有效值与瞬时值

I_A ——晶闸管阳极电流

I_{AVM} ——最大允许平均值电流

I_b, i_b ——晶体管基极电流有效值与瞬时值

I_c, i_c ——晶体管集电极电流有效值与瞬时值

I_{c0} ——晶体管集电极漏电流

I_{cs} ——晶体管集电极饱和电流

I_d, i_d ——整流电路输出直流电流平均值与瞬时值

I_D ——静态断态电流

I_{d0} ——临界直流平均电流

I_{dK} ——流过晶闸管的平均电流

I_{dM} ——整流电路直流电流最大值

$I_{d\pi}$ ——流过整流管的平均电流

$I_{d\pi R}$ ——流过续流二极管的平均电流

I_e, i_e ——晶体管发射极电流有效值与瞬时值

I_f ——整流管正向电流

I_g ——门极电流

I_H ——维持电流

I_K, i_K ——流过晶闸管的电流有效值与瞬时值

I_L ——擎住电流

I_L ——三相制中的线电流

I_0 ——变压器励磁电流（空载电流）有效值；非正弦周期电流的直流分量

I_R ——整流管反向电流

I_{RM} ——晶闸管反向恢复电流峰值

$I_{RR(AV)}$ ——反向重复平均电流

I_{RRM} ——反向重复峰值电流

I_{TSM} ——通态浪涌电流

I_T ——通态平均电流

I_s, i_s ——流过整流管的电流有效值与瞬时值

I_{sR}, i_{sR} ——流过续流二极管的电流有效值与瞬时值

I_ϕ ——三相制中的相电流

i_C ——电容器的充放电电流

i_D ——流过二极管、整流管的电流

I_k —— k 次谐波电流有效值

i_L ——流过电感的电流

i_0 ——变压器励磁电流的瞬时值

i_p ——两整流桥之间的环流（平衡电流）

K ——过电压系数

K_I ——均流系数

K_v ——均压系数

L_s ——变压器漏抗

L_d ——整流滤波电感

L_r ——限制电流变化率的电感

L_M ——变压器励磁电感

L_p ——平衡电抗器电感

L_s ——变压器漏感

m ——相数；一个周期的脉波数

N ——绕组匝数

n ——电动机转速；串（并）联晶闸管数

P_d ——整流输出的直流功率

Q_R ——晶闸管反向恢复电荷

R_B ——考虑重叠角换向压降的等效内阻

R_b ——晶体管基极电阻；变压器绕组的等效电阻

- R_o —— 晶体管集电极电阻
 R_f —— 整流管正向电阻
 R_p —— 均压电阻
 R_R —— 整流管反向电阻
 S —— 表观功率 (视在功率), 面积
 S_1, S_2 —— 变压器一、二次侧表观功率
 S_N —— 变压器容量
 T_k —— 脉冲持续时间; 脉冲最小宽度
 T_x —— 脉冲间歇时间
 t_d —— 电路提供给晶闸管的关断时间; 延迟时间
 t_{gi} —— 晶闸管 (门极控制) 开通时间
 t_q —— 晶闸管关断时间
 t_r —— 上升时间
 t_s —— 存贮时间
 t_t —— 渡越时间
 t_u —— 晶闸管换流时间
 t_w —— 到达稳态所需的时间
 t_x —— 延迟时间
 U_{AK} —— 整流管、晶闸管阳极与阴极间的电压 (阳极电压)
 U_{BO} —— 正向转折电压
 U_d, u_d —— 整流电路的输出直流电压平均值与瞬时值
 U_{d0} —— 延迟角 $\alpha = 0^\circ$ 时输出直流平均电压
 U_{da} —— 延迟角为 α 时输出直流平均电压
 $U_{d\beta}$ —— 超前角为 β 时逆变平均电压
 U_{DRM} —— 断态重复峰值电压
 U_{DSM} —— 断态不重复峰值电压
 U_f —— 整流管正向电压
 U_L —— 三相制中的线电压有效值
 U_k —— 控制电压
 U_0 —— 非正弦周期电压的直流分量
 U_{pM} —— 两组整流桥之间的最大电压差
 U_{RRM} —— 反向重复峰值电压
 U_{RSM} —— 反向不重复峰值电压

- U_T ——晶闸管通态平均电压
 U_{ro} ——门槛电压
 U_s ——谐波分量电压有效值
 U_ϕ ——三相制中相电压有效值
 u ——换相（流）重叠角；电压瞬时值
 u_b ——偏移电压
 u_d' ——换相期间整流电压的瞬时值
 u_{du} ——考虑重叠角的输出直流平均电压
 $u_{d_{oa}}$ ——考虑延迟角、重叠角的输出直流平均电压
 u_{σ} ——晶闸管门极（触发）电压瞬时值
 $u_{\sigma i}$ ——基准电压
 $u_{\sigma n}$ ——反组控制脉冲电压
 $u_{\sigma p}$ ——正组控制脉冲电压
 $u_{\Delta\%}$ ——整流变压器的短路电压比
 u_r ——两组整流桥之间的电压差
 u_r ——纹波电压
 u_s ——锯齿波电压
 u_{sr} ——输入电压
 u_{so} ——输出电压
 u_s ——调制信号电压，同步电压
 u_x ——移相电压
 u_{sa} ——载频信号电压
 X ——电抗器的电抗
 X_B ——变压器每相漏抗
 x_p ——平衡电抗器的电抗
 z ——负载阻抗
 α ——晶闸管的延迟角；放大系数
 β ——晶闸管的超前角
 γ_m ——脉动系数
 γ_q ——畸变因数
 γ_w ——波形因数
 δ ——晶闸管关断时间折合的电角度；衰减系数；晶闸管导通时间与固定重复周期的比值

- η ——单结晶体管分压比, 效率
- θ ——晶闸管的导通角
- θ_{jN} ——晶闸管的额定结温
- ϕ ——位移因数角, 磁通量
- φ ——相位角, 功率因数角
- ω ——角频率
- ω_0 ——固有角频率
- ω_s ——变频电路中表示交流电源的角频率
- λ ——裕量角
- ε ——变压器空载电流百分比
- ψ ——正弦量的初相角
- τ ——时间常数

目 录

常用符号表

第一章 非正弦周期电流电路	1
第一节 非正弦周期电流的产生	1
第二节 非正弦周期量分解为傅氏级数	2
一、傅氏级数的一般表达式	2
二、利用对称性确定系数	4
三、实例分析	6
第三节 非正弦周期电流线性电路的计算	20
一、非正弦周期量的有效值	20
二、非正弦周期量的平均值	22
三、纹波因数、脉动系数与畸变因数	23
四、非正弦周期电流线性电路中的平均功率	23
五、非正弦周期电流线性电路的计算	25
第四节 三相对称非正弦周期电流的线性电路	26
一、三相对称非正弦周期量的分解	28
二、星形-星形联结	29
三、电源三角形联结	30
第二章 输入为阶跃电压和矩形脉冲电压的电路	32
第一节 输入为阶跃电压的RC电路	32
一、方程的建立与求解	32
二、电压、电流变化的规律	35
三、RC微分电路	37
四、RC积分电路	38
第二节 输入为矩形脉冲电压的RC电路	39
一、输入为正向矩形脉冲电压的RC电路	39
二、输入为多个正向矩形脉冲电压的RC电路	41
三、输入为正、负向矩形脉冲电压的RC电路	43
第三节 输入为阶跃电压的RL电路	45
一、方程的建立与求解	45
二、 u_R 与 u_L 的变化规律	46

第四节 输入为矩形脉冲电压的 RL 电路	47
第五节 输入为阶跃电压的 RLC 电路	48
一、振荡充电过程	49
二、非振荡临界充电过程	49
三、非振荡充电过程	50
第六节 电容 C 通过 RL 振荡放电	50
第七节 输入为矩形脉冲电压的 RLC 电路	51
第八节 输入为阶跃电压的具有二极管的 LC 电路	52
第三章 电力半导体开关	54
第一节 开关二极管	54
一、二极管的伏安特性及其等效电路	54
二、二极管的开关特性	56
第二节 开关晶体管	58
一、晶体管特性曲线及开关状态时的等效电路	58
二、晶体管的开关特性	61
三、利用加速电容改善开关特性	63
第三节 晶闸管	64
一、晶闸管的双晶体管等效模型	64
二、晶闸管的伏安特性	67
三、晶闸管的主要参数	69
四、晶闸管的主要类型和用途	72
第四章 单相晶闸管可控整流电路	73
第一节 单相半波可控整流电路	73
一、电阻性负载	73
二、电感性负载	78
第二节 单相桥式可控整流电路	80
一、单相桥式全控整流电路	80
二、单相桥式半控整流电路	94
第五章 三相晶闸管可控整流电路	102
第一节 三相半波(三相零式)可控整流电路	102
一、电阻性负载	102
二、电感性负载	111
三、反电势负载	116

四、共阴极接法与共阳极接法的比较	120
五、三相变压器的联结方式	122
第二节 三相桥式全控整流电路	125
一、三相桥式全控整流电路的组成及其工作原理	125
二、电阻性负载	129
三、电感性负载	137
第三节 三相桥式半控整流电路	141
一、电阻性负载	141
二、电感性负载	146
三、三相桥式半控整流电路与三相桥式全控整流电路的比较	150
第四节 多相可控整流电路	151
一、六相半波可控整流电路	152
二、带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	152
三、十二相可控整流电路	161
四、其他多相可控整流电路	173
第五节 考虑变压器漏抗的整流电压	176
一、换相(换流)期间整流电压的瞬时值	176
二、换相平均压降 ΔU_d	178
三、换相期间的两相电流	180
四、考虑重叠角 μ 以后的输出直流平均电压	183
五、重叠角 μ 的计算	185
六、考虑变压器漏抗时,其他典型可控整流电路的输出电压波形	186
第六节 直流电动机负载的可控整流电路	192
一、工作原理及波形分析	192
二、晶闸管整流器供电的直流电动机的机械特性	199
第七节 可控变流装置的功率因数	203
一、功率因数的基本表示方法	203
二、改善功率因数的方法	208
第六章 有源逆变电路	209
第一节 逆变电路的概念	209
第二节 三相半波逆变电路	210
第三节 三相桥式逆变电路	213
一、三相桥式逆变电路的工作原理	213

二、在逆变状态下考虑重叠角 u 的 u_d 波形	216
第四节 逆变失败的原因	217
一、触发电路工作不可靠	217
二、晶闸管发生故障	218
三、交流电源出现问题	219
第五节 最小超前角(逆变角)的确定	219
第六节 在逆变状态下工作的直流电动机的机械特性	221
一、电流连续时的机械特性	222
二、电流断续时的机械特性	224
第七章 无源逆变电路	227
第一节 无源逆变的概念	227
第二节 晶闸管的换流方法	228
一、交流电网换流(F类换流方式)	228
二、谐振负载换流(A类换流方式)	229
三、LC电路换流(B类换流方式)	230
四、反复电路换流(C类换流方式)	232
五、由辅助晶闸管接通C或LC的换流(D类换流方式)	233
六、外部脉冲换流(E类换流方式)	235
第三节 单相并联逆变电路	236
一、工作原理	236
二、实用的单相并联逆变电路	238
第四节 单相桥式并联逆变电路	241
一、工作原理	242
二、电压、电流换向过程及波形分析	242
三、电路的改进	247
第五节 单相桥式并联谐振逆变电路	248
一、逆变电路的工作原理	249
二、电压、电流波形分析	251
第六节 三相桥式并联逆变电路	254
一、三相桥式并联逆变电路的工作原理	254
二、根据不同换流方式设计的三相桥式并联逆变电路	260
第七节 单相串联逆变电路	265
一、工作原理	265

二、换流方式·····	266
三、电压、电流方程式·····	267
第八节 单相桥式串联逆变电路·····	270
一、工作原理·····	270
二、电路的改进·····	272
第九节 三相串联逆变电路·····	274
第十节 电压型与电流型逆变电路的概念·····	274
第十一节 脉宽调制(PWM)逆变电路·····	275
一、单极性脉宽调制·····	276
二、双极性脉宽调制·····	280
三、晶闸管脉宽调制逆变电路·····	282
第八章 交流-交流变频电路·····	286
第一节 倍频电路·····	286
一、电网换流式倍频电路·····	286
二、谐振负载换流式倍频电路·····	288
第二节 单相-单相直接变频电路·····	291
一、电阻性负载·····	291
二、电感性负载·····	292
三、改变每半个周期延迟角的变频电路·····	295
第三节 三相-单相直接变频电路·····	302
第四节 三相-三相直接变频电路·····	305
第九章 直流斩波电路与交流调压电路·····	307
第一节 直流斩波的类型及其工作原理·····	307
第二节 逆阻型晶闸管直流斩波电路·····	311
一、输出电压脉宽恒值的逆阻型晶闸管直流斩波电路·····	311
二、输出电压脉宽可调的逆阻型晶闸管直流斩波电路·····	314
三、几种加速换流电路及其输出电压波形·····	316
四、两段输出电压脉宽可调的逆阻型晶闸管直流斩波电路·····	318
五、输出电压脉宽可调、极性可逆的逆阻型晶闸管直流斩波电路·····	320
六、多相错位逆阻型晶闸管直流斩波电路·····	320
第三节 逆导型晶闸管直流斩波电路·····	322
第四节 可关断晶闸管直流斩波电路·····	324

一、输出电压脉宽可调的可关断晶闸管直流斩波电路	324
二、输出电压局部可调的可关断晶闸管直流斩波电路	325
第五节 交流调压电路	326
一、概述	326
二、交流零触发开关电路	326
三、单相交流调压电路	331
四、三相交流调压电路	337
第十章 保护	344
第一节 晶闸管的过电流及其保护	344
一、晶闸管的过电流承受能力	344
二、过电流保护的一般方法	345
第二节 过电压及晶闸管的过电压保护	349
一、几种主要的过电压情况	349
二、过电压保护概述	352
三、限制过电压的非线性元件	353
四、用非线性元件抑制过电压	357
五、用RC抑制过电压	360
第三节 晶闸管的 di/dt 承受能力及其保护	365
第四节 晶闸管的 du/dt 承受能力及其保护	366
第五节 晶闸管串联时的均压	367
一、静态均压	367
二、晶闸管反向阻断恢复过程中的动态均压	369
三、晶闸管开通过程中的动态均压	371
第六节 晶闸管并联时的均流	371
一、静态均流	371
二、动态均流	372
第十一章 电力半导体变流器的触发电路	377
第一节 晶闸管变流器对相控触发电路的要求	377
一、晶闸管相控触发电路概述	377
二、晶闸管的门极伏安特性	380
三、触发脉冲的波形参数及其对变流器的影响	383
四、触发脉冲的不对称性	388
第二节 多通道相控触发电路	388

一、概述.....	388
二、多通道相控触发电路的工作原理.....	389
三、按垂直控制原理工作的相控触发电路.....	389
四、按垂直控制原理构成的多通道相控触发电路基本环节 的分析.....	391
五、按垂直控制原理工作的相控触发电路的实例.....	426
六、按积分控制电压原理工作的相控触发电路.....	430
七、其他类型的多通道相控触发电路.....	431
八、脉冲变压器的分析.....	437
第三节 单通道及三通道相控触发电路.....	445
一、单通道相控触发电路.....	445
二、三通道相控触发电路.....	449
三、异步相控触发电路.....	461
四、锁相相控触发电路.....	468
第四节 内部及外部因素对相控触发电路正常工作的影响.....	478
一、触发脉冲不对称的原因.....	478
二、触发脉冲的不对称度对变流器正常工作的影响.....	483
三、提高触发脉冲对称度的措施.....	486
四、电网换相畸变对相控触发电路的影响.....	487
五、抗干扰的一般措施.....	493
第五节 电网电压的滤波.....	495
一、LC低通滤波器.....	495
二、RC低通滤波器.....	498
第六节 强迫换相变流器的触发电路.....	499
第七节 大功率晶体管、可关断晶闸管和双向晶闸管的 触发电路.....	507
一、大功率晶体管的触发电路.....	507
二、可关断晶闸管(GTO)的触发电路.....	509
三、双向晶闸管的触发电路.....	513
参考文献.....	518