

电力电子技术丛书

电力半导体直流稳定电源

郑一帆 主编



机械工业出版社

本书是《电力电子技术丛书》之一。全书共分七章，着重介绍电力半导体直流稳定电源的三种主要类型：大功率晶体管调整直流稳定电源、晶闸管相控直流稳定电源和变换器式直流稳定电源的基本工作原理和电路设计。书中对高稳定晶闸管相控电源的触发控制系统和纹波抑制技术、稳定电源的动态品质和调节器设计、各种稳定电源中所采用的基准源和采样装置也都作了较为详细的介绍，还列举了一些设计实例和具体电路供读者在实践中参考。此外，本书还介绍了直流稳压电源、稳流电源和稳功率电源主要性能指标的测试方法。

本书供从事电力半导体直流稳定电源设计、制造和使用的工程技术人员等阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电力电子技术丛书

电力半导体直流稳定电源

郑 机 主编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $8^{3/8}$ · 插页 1 · 字数 221 千字

1985年11月北京第一版·1985年11月北京第一次印刷

印数 0,001—4,130 · 定价 2.50 元

*

统一书号：15033·5921

前 言

编 委 会 委 员

随着电力半导体器件和电子技术的发展，以大功率晶体管和晶闸管为功率变换和控制器件的电力半导体直流稳定电源也日臻完善，并在国民经济各部门中得到愈来愈广泛的应用。这种电源的功率一般为几百瓦至数兆瓦（短时可达100兆瓦），输出电流从几安到数千安以上，电源的稳定度通常为 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 。它不仅可作为大型精密电子设备、计算机、电气物理仪器、等离子体、超导体以及电化学加工设备的电源，还可作为高精度大电流测量装置的校准电源等。为了普及电力半导体直流稳定电源的有关技术知识，帮助从事电力半导体直流稳定电源设计、制造和使用的广大技术人员更好地了解这种电源的基本工作原理、电路设计和性能测试，根据需要选择和设计符合要求的电力半导体直流稳定电源，特编写这本书。

本书由机械工业部北京机械工业自动化研究所郑机同志主编。参加编写的还有该所的施瑞华、蓝利平、卢贵喜、关鹏和杨自农等同志。

清华大学蔡宣三副教授审阅了本书并提出许多宝贵意见，电力电子技术丛书编委会召开了审稿会对本书进行了认真审查并提出了很好的修改意见。此外，机械工业自动化研究所三室电源专业组的同志在编写本书的过程中给予了大力支持，提供了不少资料，谨在此一并表示感谢。由于编者水平有限，时间也较仓促，书中的缺点和错误在所难免，恳望读者不吝指正。

编者 一九八四年三月

目 录

第一章 概 述	1
第一节 稳定电源的基本工作原理和分类	1
第二节 稳定电源的主要性能指标	6
第三节 稳定电源的保护	8
第二章 大功率晶体管直流稳定电源	10
第一节 串联型稳定电源的基本工作原理	10
第二节 预调压电路	13
一 交流调压器调压电路	13
二 饱和电抗器调压电路	16
三 晶闸管调压电路	19
第三节 调整管电路	24
一 单管允许的耗散功率	24
二 大功率晶体管并联均流电路	25
三 复合调整管电路	27
四 调整管电路的等效电流放大倍数和等效输入、输出电阻	28
五 高效率调整管电路	31
第四节 稳流和稳压电源电路	33
一 稳流电源电路	34
二 稳压电源电路	35
三 有预稳定电压的稳流电源电路	36
第五节 保护电路	37
一 截流型过电流保护电路	38
二 过电流、断相和断水继电保护	40
第六节 稳定电源的不稳定因素分析	42
一 共发射极稳流电源的等效电路及其表达式	42
二 共发射极稳压电源的等效电路及其表达式	43
三 不稳定因素分析	44

第三章	晶闸管直流稳定电源	48
第一节	晶闸管交流调压的直流稳定电源	48
一	晶闸管三相交流调压电路	48
二	交流调压在直流稳定电源中的应用	49
三	交流调压存在的一些问题	49
第二节	晶闸管相控直流稳定电源	50
一	基本工作原理	50
二	对晶闸管相控直流稳定电源的评价	52
第三节	可控整流电路的主要类型及参数计算	54
一	常用的可控整流电路	54
二	带两只中心二极管的三相全控桥式整流电路	61
三	整流电路的串联、并联运行	63
四	整流-逆变-旁路工作方式	65
五	整流变压器常用的接线方式	66
第四节	晶闸管的触发控制系统	70
一	对触发电路的要求	70
二	同步触发控制系统	71
三	异步触发控制系统	82
四	强触发电路	90
第五节	晶闸管稳定电源中的滤波器	93
一	无源滤波器	93
二	有源滤波器	101
三	分谐波反馈电路组件	109
第四章	变换器式直流稳定电源	114
第一节	晶体管变换器式稳定电源	114
一	自激晶体管变换器式稳定电源	115
二	他激晶体管变换器式稳定电源	120
第二节	晶闸管变换器式稳定电源	139
一	基本工作原理	139
二	逆变器	141
三	晶闸管变换器式稳定电源举例	155
第五章	稳定电源的动态特性及调节器的工程设计	157

第一节	稳定电源的基本结构及工作原理	157
一	基本结构	157
二	工作原理	158
第二节	稳定电源系统的稳态误差分析	159
一	与系统结构类型有关的静态误差	160
二	其他因素引起的稳态误差	165
第三节	稳定电源系统的稳定性分析	167
一	时域分析法	168
二	频率分析法	170
第四节	稳定电源系统的校正和校正装置	177
一	电源系统的校正	177
二	常用的校正装置	181
第五节	调节器的工程设计	188
一	对数频率设计法	188
二	二阶工程设计法	194
三	三阶工程设计法	205
四	多环调节系统	210
第六章	直流稳定电源中的基准源和采样装置	219
第一节	基准源及其输出调节电路	219
一	基准源的类型	219
二	稳压管的特性	220
三	高稳定基准源电路	224
四	基准源的输出调节电路	227
第二节	电压采样装置	228
第三节	电流采样装置	230
一	标准电阻	231
二	直流互感器	232
三	零磁通电流传感器	237
四	霍尔电流传感器	241
第四节	功率采样装置	243
第七章	直流稳定电源的性能测试	245
第一节	性能测试的内容和基本要求	245

第二节 性能测试的方法	246
一 稳定输出量调节范围和调节分辨率的测试	246
二 电源输入电压变动引起稳定输出量变化的测定	247
三 负载变动引起稳定输出量变化的测定	248
四 稳定输出量温度系数的测定	250
五 纹波和噪声的测定	251
六 漂移的测定	252
七 过渡特性的测定	253
八 输出阻抗的测定	255
九 保护性能试验	255
十 电源的稳定度及其计算	256
参考文献	257

第一章 概 述

电力半导体直流稳定电源是一种以晶闸管（习称可控硅元件）、硅整流管以及大功率晶体管为功率变换和控制器件的大功率稳定电源。这种电源的功率一般为几百瓦至几兆瓦，输出电流从几安到数千安，电源的稳定度一般为 10^{-2} 到 10^{-5} 。它被广泛地用作精密的电子设备、计算机、电气物理仪器、等离子体、超导体以及电化学加工设备的直流供电电源，而且也可作为电流测量装置等的校准电源。

过去，大功率、大电流的直流稳定电源大多采用直流发电机组以及闸流管、汞弧整流器供电和磁放大器控制的电源。随着晶闸管、大功率晶体管以及控制技术的发展，七十年代以来，电力半导体直流稳定电源有了迅速发展。电源的稳定度、纹波等主要性能指标都超过了直流发电机组电源。直流发电机组电源由于存在体积大，效率低，响应速度慢，动态稳定度差以及带有转动部件、维护麻烦等缺点，目前，一般已不再采用它作为稳定电源。电气特性和晶闸管相似的闸流管、汞弧整流器也由于在器件的体积、重量、工作寿命、可靠性以及结构的坚固性等方面远不及晶闸管，而且维护也没有晶闸管简单，因此，目前基本上也为晶闸管所取代。

本书将着重介绍广泛地应用于工业、科研等部门的电力半导体直流稳定电源。

第一节 稳定电源的基本工作原理和分类

为了了解电力半导体直流稳定电源的基本工作原理，首先看一下采用手动调节的电力半导体直流电源。图 1-1 为其原理方框图。电网电压 U 经调压器调压后送到整流变压器。由整流变压器和整流器，将交流输入电压 U_1 ，变换为大小合适的直流电压，经滤波

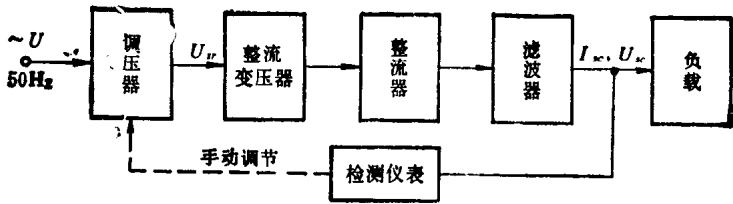


图1-1 采用手动调节的电力半导体直流电源原理方框图

器滤除整流器输出电压中的交流纹波，得到平滑的直流电压 U_{sc} 供给负载。当交流电压或负载电阻变化时，通过检测仪表我们可以发现电源的输出电压 U_{sc} 和输出电流 I_{sc} 都要改变，这种变化如不调节，一般可能达到 $\pm 20\%$ 以上。当输出变化时，如果我们人为地调节调压器，亦即改变 U_{1r} ，就可以根据要求使 U_{sc} 或 I_{sc} 恢复到原来的值，也就是说得到比较稳定的输出电压或输出电流。显然，采用这种人工的监视和调节不仅耗费人力，而且调节的速度慢，电源的稳定度差，不能满足对稳定电源提出的技术要求。

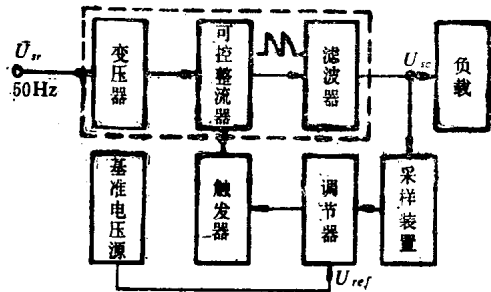


图1-2 采用自动调节的电力半导体直流稳定电源原理方框图

图1-2是一种采用自动调节的电力半导体直流稳定电源的原理方框图。从图中可以看出，该电源是由基准电压源（参考电压源）、采样装置（传感器）、调节器（比较放大环节）、可控整流器及其触发器（执行环节）、滤波器等组成的闭环自动调节系统。系统的方框图如图1-3所示。电源的输出量 U_{sc} 通过采样装置变换为合适的反馈电压 U_f 并和基准电压 U_{ref} 比较，其误差信号经调节器放大和运算，通过触发器改变可控整流器的导通角，从而改

变输出量 U_o ，以使反馈电压和基准电压平衡，即使输出量和基准电压保持一定的比例关系。因此，电源输出量的稳定度将取决于基准电压、采样装置变换系数的稳定性，调节器中放大器的漂移以及系统开环放大倍数的大小和稳定性。交流输入电压 U_{sr} 和负载电流 I_o 的变化也将作为扰动量而影响电源的稳定度。

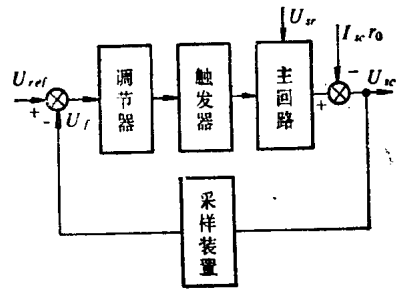


图1-3 稳定电源系统方框图

根据电源稳定输出量的不同，电力半导体直流稳定

电源（以下简称稳定电源）可以分为稳压电源、稳流电源和稳功率电源。这三种电源的理想特性如图 1-4 所示。稳压电源的稳定输出量是输出电压 U_o ，当交流输入电压 U_{sr} 、负载电流 I_o 以及环境温度 T 变化时， U_o 维持不变，即 $\Delta U_o = 0$ ，电源的内阻为零。稳压电源的应用最为广泛，不仅可以作为各种电子设备、自控装置、计算机等的供电电源，以保证这些设备的正常工作，并达到一定的技术性能指标，而且还可作为高稳定度电源的前级。稳流电源的稳定输出量是输出电流 I_o ，当交流输入电压 U_{sr} 、负载电阻 R_L （或输出电压 U_o ）以及环境温度 T 变化时， I_o 维持不变，即 $\Delta I_o = 0$ ，电源的内阻为无穷大。稳流电

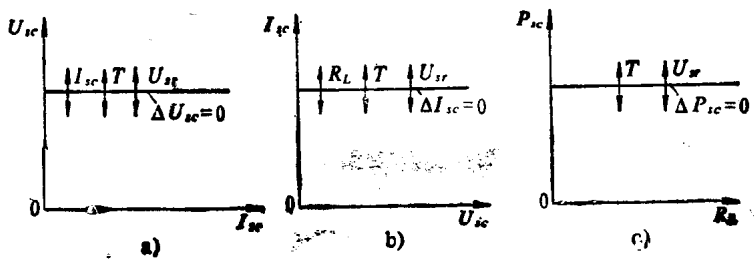


图1-4 直流稳定电源的理想特性

- a) 稳压电源
- b) 稳流电源
- c) 稳功率电源

源主要用作电气物理仪器的电磁铁电源，等离子体、超导体的供电电源，电化学加工、蓄电池充电电源以及电磁测量装置的校准电源等。与此相仿，稳功率电源的稳定输出量是输出功率 P_o 。这种电源的应用目前还比较少，主要用作要求加热温度稳定以及恒功率调节的某些装置电源。

按照控制方式的不同，稳定电源还可分为以下几种：

1. 线性控制方式 这种控制方式的稳定电源如图 1-5 所示。它又可分为串联调整和并联调整两种方式。它是利用大功率晶体管的放大特性来进行工作的。因此，电源的稳定特性好，响应速度快，噪声小，同时电路也较简单。但是由于串联或并联地接入了大功率晶体管，因此这种方式的电源效率比较低，特别是作为低压大电流电源时的效率更低。它广泛地用作高稳定度的中小功率电源。

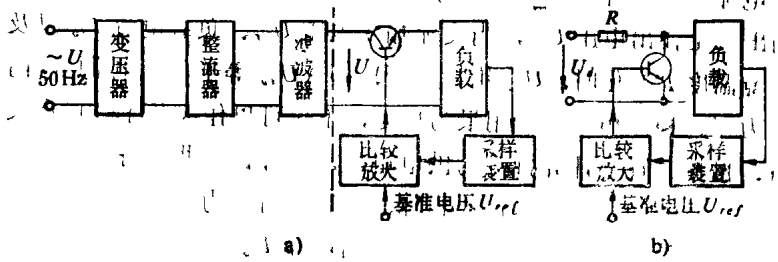


图1-5 线性控制方式的稳定电源

a) 串联调整方式 b) 并联调整方式

2. 相位控制方式 这种控制方式的原理方框图如图 1-2 所示。它是利用晶闸管的相控特性来稳定输出量。晶闸管相控调节时输出电压纹波大，对电网干扰较严重，由于有一定的失控时间，因此，电源的响应速度较线性控制方式慢。但是，和前者相比，这种电源的效率高、可靠性好，由于控制技术的发展，高稳定度的相控电源已经有了迅速发展，它尤其适合作大功率大电流的稳定电源。

3. 开关控制方式 这种控制方式的稳定电源如图 1-6 所示。它又可分为斩波器方式和变换器方式两种。它是利用晶体管或晶

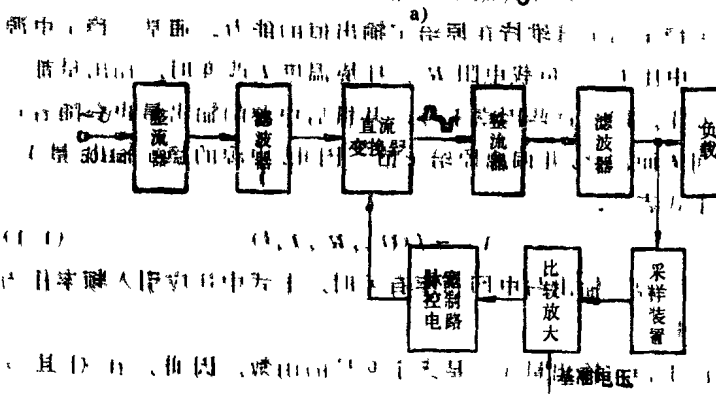
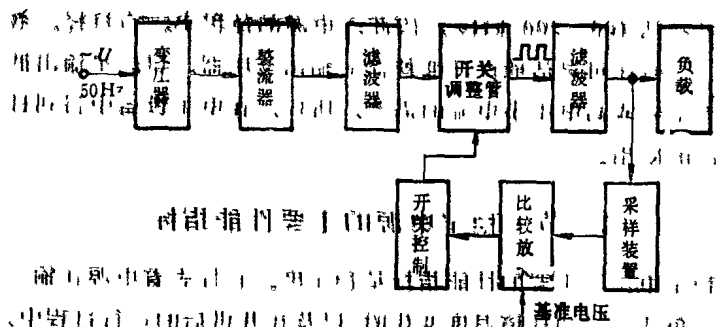


图 16 (a) 斩波器方式 (b) 变换器方式

闸管的开关特性来进行工作。因此，电源的效率高，体积小，但噪声大。斩波器方式中所用的开关调整管工作于脉冲开关状态，控制电路通过调整管调节输出方波脉冲电压的占空比，从而改变输出电压的平均值。变换器式的开关电源是一种将直流电压通过变换器变成几千赫至几十千赫的矩形波或近似正弦波的电压，然后经高频整流滤波变为另一种直流电压的装置。七十年代以来，这种电源得到了迅速发展。尽管这种电源的噪声较大，稳定度较差，响应速度也不及线性控制方式的稳定电源，但是，由于这种电源可以不用工频变压器，大功率管工作在开关状态，变换器的

频率可高达 100~200 kHz，因此，电源的体积小，重量轻，效率高，同时还可灵活地设计变换器的输出变压器，以满足输出低电压大电流或高电压小电流的需要，所以，在电子设备中得到日益广泛的应用。

第二节 稳定电源的主要性能指标

稳定电源最主要的性能指标是稳定度。它标志着电源在输入电压、负载电阻和环境温度变化时，以及在开机后的运行过程中，使电源稳定输出量维持在原给定输出值的能力。通常，稳定电源在输入电压 U_{sr} 、负载电阻 R_L 、环境温度 T 改变时，输出量都会发生变化，即使这些因素不变，开机后电源的输出量也会随着运行时间 t 而漂移，并偏离原给定值。因此，电源的稳定输出量 Y_{so} 可用下式表示：

$$Y_{so} = f(U_{sr}, R_L, T, t) \quad (1-1)$$

当电源的输出与电网频率有关时，上式中还应引入频率作为一个变量。

由于稳定输出量 Y_{so} 是多个变量的函数，因此，在对其变化量 dY_{so} 进行计算时，必须分别对各个变量单独变化时所引起的输出量变化进行计算，然后再予以综合。而当计算某一变量变化而引起的输出量变化时，把其他变量均看作为常量。这样，所得到的输出量对该变量的导数即是偏导数 $\frac{\partial Y_{so}}{\partial U_{sr}}$ 、 $\frac{\partial Y_{so}}{\partial R_L}$ 、 $\frac{\partial Y_{so}}{\partial T}$ 、 $\frac{\partial Y_{so}}{\partial t}$ 等。这些偏导数与相应变量的增量之积就是该变量所引起的输出量变化。

对于不同稳定输出量的电源，其输出随上述因素变化而偏离给定值的变化量可用下列各式表示：

$$dU_{so} = \frac{\partial U_{so}}{\partial U_{sr}} dU_{sr} + \frac{\partial U_{so}}{\partial I_{so}} dI_{so} + \frac{\partial U_{so}}{\partial T} dT + \frac{\partial U_{so}}{\partial t} dt \quad (1-2)$$

$$dI_{so} = \frac{\partial I_{so}}{\partial U_{sr}} dU_{sr} + \frac{\partial I_{so}}{\partial R_L} dR_L + \frac{\partial I_{so}}{\partial T} dT + \frac{\partial I_{so}}{\partial t} dt \quad (1-3)$$

3. 温度系数 表示在输入电压和负载不变时, 输出量的变化量与环境温度变化量之比。稳压电源的电压温度系数可用下式表示:

$$K_{UT} = \left. \frac{\Delta U_{so}}{\Delta T} \right|_{U_{sr}, R_L = \text{常数}} \quad (1-9)$$

同样, 稳流电源和稳功率电源的温度系数也可用相应的电流温度系数(K_{IT})和功率温度系数(K_{PT})表示。即

$$K_{IT} = \left. \frac{\Delta I_{so}}{\Delta T} \right|_{U_{sr}, R_L = \text{常数}} \quad (1-10)$$

$$K_{PT} = \left. \frac{\Delta P_{so}}{\Delta T} \right|_{U_{sr}, R_L = \text{常数}} \quad (1-11)$$

稳定电源除了稳定性指标外, 还有电源的纹波以及最大输出值、输出的调节范围、调节分辨率(细度)、响应速度等指标。电源的纹波大小, 通常以电源直流输出量中所包含的交流分量的有效值或峰峰值来表示。对于纹波分量比较规律的交流整流式电源有时也采用脉动系数 S 来表示纹波的大小, 例如, 对于稳压电源

$$S = \frac{U_{o,m}}{U_o} \quad (1-12)$$

式中 $U_{o,m}$ ——输出中基波纹波电压的峰值;

U_o ——直流输出电压。

稳定电源的上述性能指标在不同的工作条件下往往是不同的。为了得到确切的数据, 应当按照一定的测试条件和方法进行测试。这将在第七章中作介绍。

第三节 稳定电源的保护

为了提高稳定电源的可靠性, 避免电源各部件的损坏及故障的扩大, 通常, 稳定电源中都须设置过电压和过电流保护电路。由稳定电源供电的一整套设备有时也对电源提出类似的保护要求。有的是对电力半导体器件的保护, 有的是对整机的保护。过电压保护回路一般是由 RC 电路、稳压二极管、晶体管及晶闸管等组成。在高电压场合, 有时采用压敏电阻、放电间隙或放电管来实

第二章 大功率晶体管直流稳定电源

小功率晶体管直流稳定电源用途很广，有的成为电子仪器和设备的组成部分；有的广泛地应用在实验室中，成为常用的试验设备。有关小功率直流稳定电源的技术问题，在很多书刊中已有详细的叙述，本章不再介绍。本章着重介绍给加速器、质谱仪等电气物理仪器的磁铁供电的大功率晶体管高稳定度直流稳流电源，以及作为其它用途的高稳定度直流稳压电源。这类电源的输出功率大多为几千瓦到几十千瓦，稳定度在 5×10^{-5} 以上。电源的输出大多数要求能由零调到最大值。这类电源和小功率直流稳定电源相比，在原理上相同，构成环节也基本上一致。根据调整管和负载连接的方式不同，可分为两大类：调整管和负载并联的，称为并联型稳定电源；调整管和负载串联的，称为串联型稳定电源。并联型和串联型相比，主要优点是电路简单、价格较低、在输出短路时不会损坏调整管。但是，由于调整管和负载并联，在负载可变时效率较低，而且不易做得稳定。串联型稳定电源则具有稳定度和效率都较高等优点，因而，多数大功率高稳定度电源采用串联型。

第一节 串联型稳定电源的基本工作原理

串联型晶体管直流稳定电源的原理方框图如图 2-1 所示。从方框图中可以看出：稳定电源由直流电压预调压电路、稳压稳流控制电路以及故障保护电路等三部分组成。

直流电压预调压电路包括三相或单相电源开关、调压器、整流变压器、整流器和滤波器等。交流电源经过电源开关接到调压器，调压器的输出接到整流变压器，其输出的交流电压经过整流器整流和滤波器滤波后，变成一个较平滑的直流电压。调压器的输出电压一般可从零调起，调压器输出电压的升或降，取决于