

国际电气工程先进技术译丛

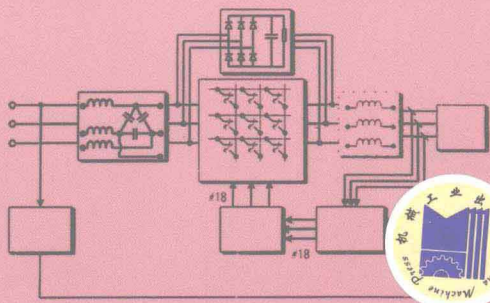
CRC Press
Taylor & Francis Group

电力变流器电路

Power Converter Circuits

(美) William Shepherd 著
Li Zhang
沈 经 张正南 译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力变流器电路

(美) William Shepherd 著
Li Zhang
沈 经 张正南 译



机械工业出版社

本书揭示了整流、逆变、周波变流和变流电路的所有关键组分——描述其通断，电压和电流的关系，还有变流器的性质、运行、控制和性能及其实际应用。书中的许多方法基于经典数学，同时包含了大量有解的数字例题。本书主要介绍了单相和三相 AC-DC 整流器电路，功率因数和谐波性能，不同的 DC-AC 逆变器电路，PWM 调制器和相位可控矩阵 AC-AC 周波变流器电路，降压、升压和降升压 DC-DC 变流器电路，以及用于 DC-DC 电路的开关模式变流器电源。

本书深入浅出、通俗易懂，非常适合用作电气工程类专业本科生与研究生的教材，也可作为电气工程师的参考书。

Authorized translation from English language edition published by CRC press, part of Taylor & Francis Group LLC. All right reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

本书版权登记号：图字 01-2006-6050 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力变流器电路/(美)谢福,(美)张礼著;沈经,张正南译. —北京:机械工业出版社,2008.10

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-24825-5

I. 电… II. ①谢…②张…③沈…④张… III. 电力系统-变流器-电路 IV. TM7 TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 122255 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:牛新国 刘星宁 版式设计:霍永明
责任校对:李秋荣 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(北京樱花印刷厂装订)

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·24.25 印张·469 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-24825-5

定价:50.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379178

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书可作为大学本科初级和高级电力电子学课程的教科书。通篇运用经典分析。本书主要叙述电力电子学电路，不涉及电力电子学开关的物理特性与制造，也不涉及电力电子学电路保护与辅助元件的设计细节。

本书对整流器电路的论述，比当前教科书中所惯用的方法更易于理解，也更详细。第 14 章讲述通常不被重视的矩阵变流器。第 13 章讲述通常被忽视的周波变流器。本书的特色是包含有大量有解的数字例题、章末问题及其答案。

本书所包含的内容已在英国利兹大学（Leeds University）、布拉德福德大学（Bradford University）和美国俄亥俄州雅典市的俄亥俄大学（Ohio University）用于课堂教学与考试。作者们对能被允许复制成有关材料表示感谢。

本书的一些短章节来源于其中一个作者较早期的工作。笔者感谢英国剑桥大学出版社（Cambridge University Press, England）允许复制这些以前的出版物。

俄亥俄大学电气工程与计算机科学学院的 Janelle Baney、Suzanne Vazzano、Erin Dill、Juan Echeverry、Brad Lafferty 经过多次反复，完成了书稿的录入工作，对此，我们表示深切的谢意。

书稿的大部分计算机文字以及插图是由俄亥俄大学奥尔登（Alden）图书馆的教育媒体服务单位（Instructional Media Service Unit）承担的。在此，我们要感谢该单位的主管 Peggy Sattler，特别感谢研究生助理 Lara Neel，并对他们的专业精神表示由衷的感谢。

最后，由俄亥俄大学教育学院毕业的研究生 Yanling Sun 和 Liangjie Zhu 完成文字校对并将材料存储到计算机磁盘中。

William Shepherd

Li Zhang

目 录

前言

物理量符号表

第 1 部分 AC-DC 变流器（整流器）

第 1 章 开关和半导体开关	1
1.1 由开关控制功率流	1
1.2 理想开关的属性	2
1.3 实际开关的属性	2
1.4 半导体变流器的类型	3
1.5 半导体开关的类型	5
第 2 章 单向不可控整流器电路	10
2.1 带电阻性负载的半波不可控整流器电路	10
2.2 带电阻负载的全波二极管电路	21
2.3 带串联 $R-L$ 负载的半波二极管	23
2.4 带串联 $R-L$ 负载的全波二极管电路	28
习题	30
第 3 章 单相可控整流器电路	35
3.1 带电阻性负载的单相可控电路	35
3.2 带串联 $R-L$ 负载的单相可控整流器	47
习题	60
第 4 章 三相半波不可控（二极管）桥式整流器电路	65
4.1 电阻性负载与理想电源	65
4.2 带变压器耦合电源的电阻性负载	70
4.3 大电感性负载与理想电源	71
4.4 在电源阻抗中出现大电感性负载	77
习题	88

第 5 章 三相半波可控桥式整流器电路	91
5.1 电阻性负载与理想电源	91
5.2 带理想电源与并联电容补偿的电阻性负载	99
5.3 大感性负载与理想电源	102
5.4 串联 $R-L$ 负载与理想电源	110
5.5 串联 $R-L$ 负载加上一个带理想电源的恒定电动势	112
5.6 电源存在阻抗时的大感性负载	112
习题	118
第 6 章 三相全波不可控桥式整流器电路	121
6.1 电阻性负载与理想电源	121
6.2 大感性负载与理想电源	129
6.3 电源存在阻抗时的大感性负载	135
习题	146
第 7 章 带无源负载阻抗的三相全波可控桥式整流器电路	149
7.1 电阻性负载与理想电源	150
7.2 大感性负载与理想电源	163
7.3 大感性负载与阻抗电源	170
7.4 总结电源电抗对全波桥式整流器工作（带大感性负载）的 影响	181
习题	182
第 8 章 整流器功率因数和脉宽调制可控整流器电路	186
8.1 三相相控整流桥的功率因数和电源电流的畸变	186
8.2 改善功率因数的方法	187
8.3 脉冲波形的性质	190
8.4 正弦脉宽调制波形的性质	193
8.5 PWM 模式下的三相桥式整流器	196
8.6 例题	199
习题	201

第2部分 DC-AC 变流器 (逆变器)

第9章 三相自然换向可控桥式整流器-逆变器	202
9.1 工作原理	202
9.2 交流系统电感的影响	207
9.3 例题	208
习题	212
第10章 三相阶梯波逆变器电路	214
10.1 逆变器电路概述	214
10.2 阶梯波逆变器的电压波形	215
10.3 谐波畸变的量度	224
10.4 6 阶梯电压波的谐波性质	224
10.5 最佳 12 阶梯波的谐波性质	225
10.6 带串联 $R-L$ 负载的 6 阶梯电压逆变器	226
10.7 例题	230
习题	235
第11章 三相脉宽调制可控逆变器电路	237
11.1 正弦脉宽调制	237
11.2 加到一个平衡的三相电阻性-电感性负载上的 PWM 电压波形	243
11.3 加到一个三相感应电动机上的 PWM 电压波形	245
11.4 例题	246
习题	253

第3部分 AC-AC 变流器

第12章 相控周波变流器	254
12.1 引言	254
12.2 单相相控双变流器	255
12.3 三相-单相周波变流器	262
12.4 三相-三相周波变流器	268
习题	276

第 13 章 包络线周波变流器	278
13.1 单相周波变流器工作	278
13.2 三相-单相周波变流器	279
13.3 三相-三相四线包络线周波变流器	281
13.4 三相-三相三线包络线周波变流器	287
13.5 例题	287
习题	290
第 14 章 矩阵变流器	291
14.1 矩阵变流器的工作原理	291
14.2 矩阵变流器开关	292
14.3 矩阵变流器电路	293
14.4 三相电动机应用中 PWM 矩阵变流器开关控制的要点	294
14.5 实例模拟结果 ^[34]	310
14.6 小结	311
第 4 部分 DC-DC 变流器	
第 15 章 DC-DC 变流器电路	313
15.1 降压变流器 (buck 变流器)	313
15.2 升压变流器 (boost 变流器)	322
15.3 降压-升压变流器 (buck-boost 变流器)	327
15.4 直流电动机的直流斩波控制	330
习题	333
第 16 章 开关模式变流器电源	335
16.1 高频开关	335
16.2 高频隔离变压器	336
16.3 推挽变流器	337
16.4 全桥变流器	339
16.5 单开关正激变流器	341
16.6 单开关反激变流器	346
习题	354

附录	356
附录 A 傅里叶级数的一般表达式	356
附录 B 习题的答案	357
参考文献	374

物理量符号表

$A_1 B_1 C_1$	1 阶傅里叶系数
$a_n b_n c_n$	n 阶傅里叶系数
$a_s b_s c_s$	电源端电流的傅里叶系数
e	瞬时电动势 (V)
e_c	瞬时电容电压 (V)
e_l	瞬时电感电压 (V)
e_L	瞬时负载电压 (V)
e_r	瞬时纹波电压 (V)
$e_{ab} e_{bc} e_{ca}$	三相系统中的瞬时线电源电压 (V)
$e_{aN} e_{bN} e_{cN}$	三相系统中的瞬时相负载电压 (V)
$e_{AN} e_{BN} e_{CN}$	三相系统中的瞬时相电源电压 (V)
f	频率 (Hz)
i	瞬时电流 (A)
$i_a i_b i_c$	三相系统中的瞬时线电流 (A)
i_c	瞬时电容电流 (A)
$i_{ca} i_{cb} i_{cc}$	三相系统电容分支中的瞬时电流 (A)
i_L	瞬时负载电流 (A)
i_R	瞬时电阻电流 (A)
i_s	瞬时电源电流 (A)
$i_{sa} i_{sb} i_{sc}$	三相系统线中的瞬时电源电流 (A)
i_{ss}	电流的瞬时稳态分量 (A)
i_t	电流的瞬时暂态分量 (A)
n	谐波次数
p	频率比
t	时间 (s)
I_{min}	最小方均根电源电流 (A)
I_{sc}	短路电流 (A)
$\hat{I}$	峰值正弦短路电流 (A)
L	自感系数 (H)
L_s	电源线电感的自感系数 (H)

M	调制比
N	圈数
P	平均功率 (W)
$P_a P_b P_c$	三相系统中每相的平均功率 (W)
P_{in}	平均输入功率 (W)
P_L	平均负载功率 (W)
P_s	平均电源点功率 (W)
PF	功率因数
PF_c	有补偿时的功率因数
PF_{max}	最大功率因数
Q_L	负载功率的无功分量 (VA)
R	电阻 (Ω)
RF	纹波因数
S_L	负载的视在功率 (VA)
T	时间常数 (s)
V	电池的端电压 (V)
X_c	容抗 (Ω)
X_L	感抗 (Ω)
X_{sc}	短路感抗 (Ω)
Z	阻抗 (Ω)

希腊字符

α	晶闸管的触发延迟角 (rad)
$\alpha\beta$	二极管电池充电电路中导通的限制 (第2章) (rad)
α'	电源电感引起的本征延迟角 (rad)
δ	无量纲品质因数
φ	瞬时磁通 (Wb)
ψ	电压与基波电流之间的位移角 (rad)
ψ_n	电压与 n 次谐波电流之间的位移角 (rad)
ψ_s	电压与电源电流之间的位移角 (rad)
μ	重叠角 (rad)
θ	导通角 (rad)
ω	电源角频率 (rad)
Δ	角的小值 (rad)
Φ	电源正弦电流频率的相角 (rad)
Φ_n	n 次谐波频率的正弦电流的相角 (rad)

第 1 部分 AC-DC 变流器（整流器）

第 1 章 开关和半导体开关

1.1 由开关控制功率流

在固定的电压源与负载之间的电能量流，常常由位于其间的控制器来控制，如图 1-1 所示。如果要求能流有多样性，那么，从电源看去，负载加上控制器的视在阻抗必须是变化的。相反，从负载看去，电源加上控制器的视在性质必须是可调节的。从任何一方的观点看，功率流的控制可用串接一个具有所要求性能的控制器来实现。如果用一个电流源来替代电压源，那么可并联一个合适的控制器来实现控制。

图 1-1 所示的串接控制器能采取许多不同的形式。在交流配电系统中，功率流的连续可变性是一种二次性要求，电气变压器是经常普遍使用的控制元件。插入电抗性元件是不方便的，因为合适尺寸的可变电感器与电容器既昂贵，也很占空间。要是用一个串接的可变电阻器替代就容易得多，但是要以付出相当大的能量损耗为代价。吸收有效电功率的负载通常具有能量“惯性”。因而，可以有效地影响由插入控制器产生的任何幅度变化。



图 1-1 电源、控制、负载电路框图

由控制器引入的电流幅度与功率流量的变化，可以通过电源接通时间与不接通时间之比的变化来得知。如果开关频率足够快，负载由于它的电气惯性，跟不上开关变化，那么在一个理想的控制器中就没有能量消耗。负载的电气惯

性越大，开关的频率越高，开关的干扰减小得越显著。

1.2 理想开关的属性

一个理想开关的属性大致可以概括如下：

1.2.1 一次属性

- 1) “开通”与“关断”之间的状态转换开关时间应该为零。
- 2) “开通”状态下，开关器件两端的电压降应该为零。
- 3) “关断”状态下，通过开关器件的电流应该为零。
- 4) 功率控制比（即器件的功率处理容量与实现状态转换所要求的控制电极功率之比）应该为无限大。
- 5) “关断”状态下，电压承受容量应该为无限大。
- 6) “开通”状态下，电流处理容量应该为无限大。
- 7) 开关的功率处理容量应该为无限大。

1.2.2 二次属性

- 1) 控制功能与功率流之间完全的电气隔离。
- 2) 双向电流、电压的阻断能力。

一个理想的开关通常如图 1-2



图 1-2 开关电路框图

所示。这不是一个通用的图，不同的作者会用不同的图来尝试提供有

关开关及其作用的更进一步信息。图 1-2 所示的功率流是双向的，在开通与关断开关时，没有能量消耗。

1.3 实际开关的属性

电力电子半导体开关基于超纯单晶硅的性质。这种基本材料通过复杂的工艺流程（称为掺杂）形成 p 型（正的）半导体与 n 型（负的）半导体组合在一起的晶圆片。晶圆片的大小取决于半导体开关的电流与电压额定值。晶圆片通常是圆形的，其面积大约是 $1\text{mm}^2/\text{A}$ 。一个 10A 的器件具有的直径大致是 3.6mm，而一个 500A 的装置具有的直径大致是 25mm (1in)。晶圆片通常封装在一个塑料的或金属的外壳中以进行保护，同时外壳也为结或者结的 n 型和 p 型材料所产生的热量提供散热通路。结温是半导体器件最重要的性质。

实际的半导体开关是不完美的。它们具有一定的电阻值，尽管很低，却产生一个导通电压降，虽然它的关断电阻阻值很高，但是也是有限的，因而会导致出现前向和反向漏电流，具体由所用电压的极性决定。

开通与关断（即交换）的操作并不发生在瞬时。每次转换都产生一个有限时间的延迟。开通与关断两者都伴随着热耗散，因而引起器件温度的升高。在控制负载的情况下，器件工作在频繁的开关状态，开通与关断的功率损失加到稳态导通损耗中，组成总的额外耗散损失，这些功率损失通常表现为热。控制电极的操作也在器件中产生功率耗散。

1.4 半导体变流器的类型

按照半导体开关变流器的功能，可将其分为三个主要类型。

- 1) 功率从一个交流电源转换成一个直流形式，这类变流器常被称为整流器。
- 2) 功率从一个直流电源转换成一个交流形式，这类变流器常被称为逆变器。
- 3) 功率从一个交流电源直接转换到一个具有不同频率的交流负载上，这类变流器常被称为周波变流器或矩阵变流器。
- 4) 功率从一个直流电源直接转换到一个具有不同电压的直流负载上，这类变流器常被称为斩波变流器或开关模式变流器。

1.4.1 整流器

整流就是在供电电流到负载之前，将从交流电源来的电流变换成一个单向形式的电流。当负载电流是单向时，交流电源的电流仍保持为双向（见图1-3）。对于电阻性负载，负载电压的极性是固定的。在交流电源电压的情况下，能量储存性负载的负载电流是单向的、脉冲型的。而在负载电流的周期中，在串联负载的电感元件中的负载电压可能会变化，并改变极性。

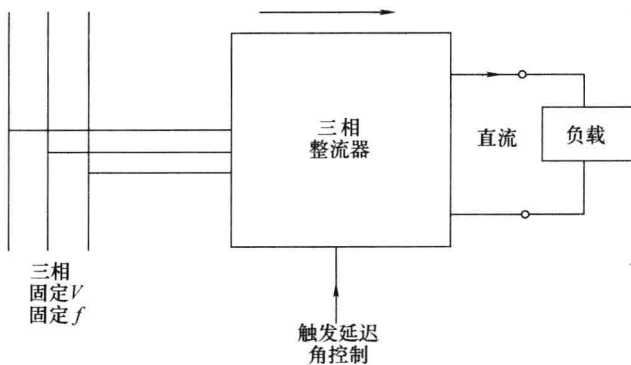


图 1-3 三相整流器电路框图

整流器电路的某些重要特性与电路的拓扑及阻抗性质无关，可分为在整流

器的电源侧和负载侧两组特性。当电源系统具有一个低的（理想地为 0）阻抗时，电源电压是正弦波，甚至当整流器从电源汲取非正弦脉冲电流时，还能在很大程度上保持在非畸变状态。对一般电路分析而言，可以假定，半导体整流器件如二极管和可控整流器是理想的开关。在导通期间，它们是无功率耗散的，并具有零电压降。而当加上反向阳极电压时，开关截止，具有无限大的阻抗。

为了探讨整流器电路的某些基本性质，可以简单地从三相电路中分离出单相电路来考虑。另外，把二极管（不可控整流器）电路与晶闸管（可控整流器）电路分开来考虑，把电阻性负载与电抗性负载分开来考虑的分类也是有帮助的。在后续章节中将对其进行阐述。

三相与单相整流器是通过电源侧电压的自然周期来换向（即关断）的。一般说来，整流器没有必要使用门极关断器件作为开关。可控整流器最常使用晶闸管作为开关。只有在特殊的应用中要求电源接受来自负载的再生功率时，才需要使用门极关断器件。

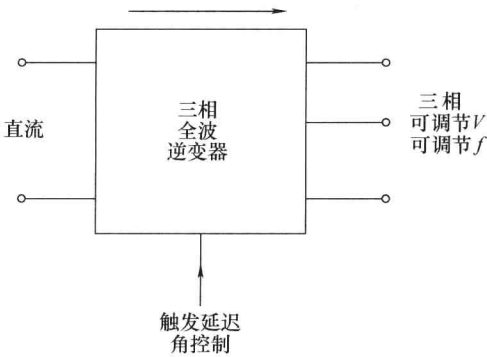


图 1-4 三相全波逆变器电路原理图

1.4.2 逆变器

从一个直流电源转移功率到一个交流电路的过程被称为逆变过程（见图 1-4）。与整流一样，运行由半导体开关器件的可控开关进行。各种形式的逆变器电路及其相关的应用在第 9 ~ 11 章中介绍。

1.4.3 周波变流器

功率可以通过半导体器件的直接开通和关断，从一个交流电源传递到另一个通常频率较低的交流负载（见图 1-5）。其换向与整流器相同，是通过电源侧

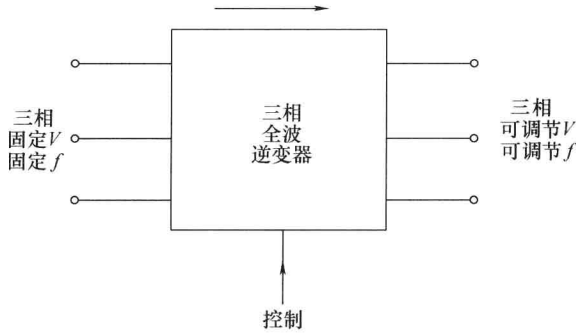


图 1-5 三相周波变流器电路框图

电压的自然周期来进行的。将在第 12、13 章中给出对于周波变流器电路及其工作原理的详细讨论。

1.5 半导体开关的类型

通常应用的半导体开关的主要类型有：

- 1) 二极管。
- 2) 功率晶体管：
 - a) 双极结型晶体管 (BJT)；
 - b) 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)；
 - c) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)；
 - d) 静电感应晶体管 (SIT)。
- 3) 晶闸管器件：
 - a) 硅可控整流器 (SCR)；
 - b) 静态感应晶闸管 (SITH)；
 - c) 门极关断 (GTO) 晶闸管；
 - d) MOS 控制晶闸管 (MCT)；
 - e) 三端双向晶闸管 (TRIAC)。

这些器件的一些相关性质的细节汇总见表 1-1。

表 1-1 各种晶闸管的性能

开关类型	电流	导通	关断	特点
理想开关	双向的	瞬时的	瞬时的	导通阻抗为 0
二极管	单向的	正向电压 ($V_A > V_K$)	反向电压 ($V_A < V_K$)	电压启动 低导通态阻抗 低导通态压降 高关断态阻抗
晶闸管				
硅可控整流器 (SCR)	单向的	正向电压 ($V_A > V_K$) 正向门极偏置 $V_G > V_K$	反向电压 ($V_A < V_K$) 以降低电流	不可能用门极关断
静电感应晶闸管 (SITH)	单向的	正向电压 $V_A > V_K$ 导通是常态 (无门极驱动)	去除正向电压 负门极信号 $V_G < V_K$	反向阻断电压低

(续)

开关类型	电流	导通	关断	特点
门极关断 (GTO) 晶闸管	单向的	正向电压 $V_A > V_K$ 和 + ve 门极脉冲 ($I_G > 0$)	θ ve 门极脉冲 ($I_G < 0$) 或电流减小	当反向阻断电压低时, 称之为不对称门极关断晶闸管
MOS 控制晶闸管 (MCT)	单向的	正向电压 ($V_A > V_K$) - θ ve 门极脉冲 ($V_G < V_K$)	+ ve 门脉冲 ($V_G > V_A$)	低反向雪崩电压
三端双向晶闸管 (TRIAC)	双向的	正向或反向电压 ($V_A > < V_K$) + ve 或 θ ve 门脉冲	用电压反向与 0 门极信号来使电流降低	理想的正向与反向阻断对称 适合于相角触发
晶体管				
双极结型晶体管 (BJT)	单向的	正向电压 $V_A > V_K$ + ve 基极驱动 $V_B > V_E$	去除基极电流 ($I_B = 0$)	级联 2 或 3 个器件生成一种高增益 (小基极电流) 的达林顿连接
金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)	单向的	正向电压 $V_D > V_S$ + ve 门脉冲 $V_G > V_S$	去除门驱动 ($V_G = 0$)	非常快的开通与关断
绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	单向的	正向电压 $V_C > V_E$ + ve 门脉冲 $V_G > V_S$	去除门驱动 ($V_G = 0$)	低的导通态损耗 非常快的开通/关断时间 低的反向阻断电压
静电感应晶体管 (SIT)	单向的	正向电压 $V_D > V_S$ 开通是正常态 ($V_G = 0$)	+ ve 门脉冲 $V_G > V_S$	也称之为高导通态压降的功率 JFET

1.5.1 二极管

二极管是电压启动型开关, 通过加上正向电压产生电流导通, 而且电流是单向的。二极管是整流器电路开关的基本类型。因为二极管不能被外部的信号所开通或关断, 所以被认为是不可控整流器。在导通期间 (见图 1-6), 其正向电流仅由外部电路的阻抗所决定。导通期间的电压降为 1 ~ 2V 的数量级, 因此在许多电力电子学计算中可以被忽略。