

开关电源技术

杨旭 裴云庆 王兆安 编著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

开关电源技术

杨旭 裴云庆 王兆安 编著

机械工业出版社

开关电源是目前应用非常广泛的一种电力电子装置,具有多方面的优点。但结构较为复杂,具有较大的设计难度。本书旨在阐明开关电源基本原理的基础上,进行合理化设计。

本书从介绍开关电源的基本概念开始,详细介绍了常用的电力电子器件和主要的无源元件,开关电源主电路的分类、结构及工作原理,开关电源控制系统的结构和原理,结合实例讲述了开关电源的主电路结构、参数和控制系统设计方法,还介绍了目前已在开关电源中广泛应用的软开关技术和功率因数校正技术。

本书供从事开关电源开发、设计生产的工程技术人员使用,也可为大中专院校电力电子技术、电气自动化技术等专业的师生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源技术/杨旭等编著. —北京:机械工业出版社, 2004. 1

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-13192-4

I. 开... II. 杨... III. 开关电源 IV. TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第095322号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年1月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·9.375印张·248千字

0 001—4000册

定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委 员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

2002年10月12日

前 言

本书是“电气自动化新技术丛书”中的一册，主要介绍开关电源的基本原理和设计方法。

开关电源是在电子、通信、电气、能源、航空航天、军事以及家电等领域应用非常广泛的一种电力电子装置。它具有电能转换效率高、体积小、重量轻、控制精度高和快速性好等优点，在小功率范围内基本上取代了线性调整电源，并迅速向中大功率范围推进，在很大程度上取代了晶闸管相控整流电源。可以说，开关电源技术是目前中小功率直流电能变换装置的主流技术。

根据应用领域和功率等级的不同，开关电源的电路结构种类繁多，控制方法灵活多样，其工程设计包括主电路、控制电路、传热、结构、电磁兼容等多方面的内容，因此开关电源的设计工作较为繁琐，难度大。国内目前仍然以工程经验和仿制为主进行设计，其缺点是缺少深入的理论基础，不能根据具体的应用去实现最合理的设计，往往造成设计裕量过大，设计过程中对产品工作状况和实际性能的预见性较差，经常出现样机试制不成功而反复修改设计的情况，造成时间和经费的浪费。

究其原因，设计工作不是设计实例的简单模仿和设计资料的拼凑，而是在理解基本原理基础之上的再创造，因此，应该在深入理解开关电源的电路、控制等的基本原理的基础之上，在设计原则的指导下，利用设计公式，并遵循一定的设计方法进行设计。本书正是按照这一思路安排内容，并试图引导读者遵循这一步骤进行设计。希望能够藉此提高国内开关电源设计工作的正确性、合理性和规范性，提高设计的水平和质量，从而最终提高产品的质量，并且解决仿制带来的知识产权问题。

本书共9章，第1章介绍了开关电源技术的一些基本概念、

发展史和发展趋势。第2、3章分别介绍在开关电源中常用的电力电子器件和变压器、电感、电容器等无源元件。第4章介绍开关电源所使用的各种开关电路的结构、工作原理和基本公式。第5章介绍软开关电路及其谐振参数的设计。第6章介绍开关电源主电路的设计步骤和设计方法。第7章介绍开关电源控制系统的基本原理，第8章介绍控制电路的设计和参数计算的方法。第9章介绍开关电源中常用的功率因数校正技术的基本原理。

本书第1章由王兆安撰写，第2、3章和9.6节由裴云庆撰写，第4~8章和第9章中1~5节由杨旭撰写，全书由杨旭统稿。本书由西安交通大学葛文运教授审阅，新疆大学马盛骏老师也校阅了大部分初稿。他们提出了许多中肯的修改意见，在此表示衷心的感谢。

本书作者虽长期从事电力电子技术的教学和研究，但由于知识、经验和水平所限，书中一定存在不少疏漏和不足之处，有些观点也值得商榷，希望读者提出宝贵的批评和意见（联系地址：邮编710049 西安交通大学电气工程学院 杨旭 Tel: 029 - 2667858）。

作者

2003年7月

符号表

B	磁通密度 (磁感应强度)
B_s	饱和磁通密度
B_r	剩余磁通密度
C	电容
C_r	谐振电容
D	固定占空比, 工作点的占空比
d	随时间变化的占空比
\hat{d}	占空比的小信号扰动
e_{on}	开关开通过程消耗的能量
e_{off}	开关关断过程消耗的能量
f_s	开关频率
H	磁场强度
I	交流电流有效值, 直流电流平均值
I_R	电流总有效值
I_1	基波电流幅值
I_{1R}	基波电流有效值
I_L	电感电流直流平均值, 电感电流交流有效值
i	电流瞬时值
i_S	开关中流过电流的瞬时值
i_L	电感电流瞬时值
i_{Lr}	谐振电感的电流
k_T	变压器一次电压与二次电压之比 (即电压比)

L	电感
L_r	谐振电感
L_{ES}	电容的等效串联电感
l	气隙长度
M	互感
N	绕组匝数
N_1	变压器的一次绕组匝数, 变压器第一个绕组的匝数
N_2	变压器的二次绕组匝数, 变压器第二个绕组的匝数
N_3	变压器第三个绕组的匝数
P	功率
p	损耗功率
R	电阻
R_{th}	热阻
R_{ES}	电容的等效串联电阻
S	开关函数
T_1	基波周期
T_S	开关周期
t_{on}	开关处于通态的时间
t_{off}	开关处于断态的时间
Δt	时间段
T_r	谐振周期
U_i	输入电压 (直流指平均值, 交流指有效值)
U_o	输出电压 (直流指平均值, 交流指有效值)
u_S	开关两端的电压瞬时值
u_C	电容两端的电压瞬时值
u_{Cr}	谐振电容的电压
X_C	容抗

α	电路在电感电流断续工作时开关关断后电感的续流时间与开关周期的比
φ	相位角, 相位差
φ_1	基波相位角
φ_n	第 n 次谐波相位角
η	效率
ξ	基波因数, 谐振阻尼比
λ	功率因数
μ_0	真空磁导率
μ_r	相对磁导率
ω_0	自然谐振角频率
ω_1	基波角频率
ω_n	第 n 次谐波角频率
ω_r	谐振角频率
ω_c	开环截止频率

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言	III
第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会成员	IV
第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话	V
前 言	VI
符号表	XIV
第1章 绪论	1
1.1 什么是开关电源	1
1.2 开关电源发展史及应用范围	6
1.3 本书的基本结构	10
1.4 小结	11
参考文献	11
第2章 电力电子器件	12
2.1 二极管	13
2.1.1 结构和工作原理	13
2.1.2 主要参数	15
2.1.3 主要类型	17
2.2 电力 MOSFET	17
2.2.1 结构和工作原理	18
2.2.2 主要参数	21
2.3 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	22
2.3.1 结构和工作原理	22
2.3.2 主要参数	25
2.4 MOSFET 及 IGBT 的驱动和保护	26
2.4.1 MOSFET 及 IGBT 的驱动	26
2.4.2 MOSFET 及 IGBT 的保护	29

2.5	功率模块及功率集成电路	32
2.6	小结	36
	参考文献	36
第 3 章	无源元件	37
3.1	电容器	37
3.1.1	电容器的主要参数	37
3.1.2	电解电容器	39
3.1.3	有机薄膜电容器	43
3.1.4	瓷介电容器	44
3.2	电感及变压器	44
3.2.1	常用的软磁材料	45
3.2.2	电感	50
3.2.3	变压器	56
3.3	小结	60
	参考文献	60
第 4 章	开关电源中的电力电子电路	61
4.1	开关电源中电力电子电路的分类	61
4.2	非隔离型电路	62
4.2.1	降压 (Buck) 型电路	64
4.2.2	升压 (Boost) 型电路	72
4.2.3	升降压 (Buck-Boost) 型电路	78
4.2.4	Cuk 型电路	83
4.2.5	Sepic 型电路	85
4.2.6	Zeta 型电路	87
4.3	隔离型电路	89
4.3.1	正激型电路	89
4.3.2	反激型电路	94
4.3.3	半桥型电路	98
4.3.4	全桥型电路	103
4.3.5	推挽型电路	108

4.4	整流电路	113
4.4.1	全桥型整流电路	113
4.4.2	全波整流电路	114
4.4.3	倍流整流电路	115
4.4.4	同步整流技术	119
4.5	回馈型电路	121
4.5.1	非隔离回馈型电路	121
4.5.2	隔离回馈型电路	124
4.6	小结	125
	参考文献	125
第 5 章	软开关技术	127
5.1	软开关的基本概念	127
5.1.1	硬开关与软开关	127
5.1.2	零电压开关与零电流开关	129
5.2	软开关电路的分类	130
5.2.1	准谐振电路	131
5.2.2	零电压开关 PWM 电路和 零电流开关 PWM 电路	131
5.2.3	零电压转换 PWM 电路和 零电流转换 PWM 电路	132
5.3	典型的软开关电路	133
5.3.1	零电压准谐振电路	133
5.3.2	移相全桥型零电压开关 PWM 电路	136
5.3.3	有源钳位正激型电路	143
5.3.4	零电压转换 PWM 电路	145
5.4	小结	148
	参考文献	149
第 6 章	主电路的设计	151
6.1	开关电源的主要技术指标及其分析	151
6.1.1	输入参数	151

6.1.2	输出参数	153
6.1.3	电磁兼容性能指标	155
6.1.4	其他指标	157
6.2	主电路设计	157
6.2.1	主电路的选型	158
6.2.2	硬开关与软开关电路的选择	158
6.2.3	正激型、推挽型、半桥型和全桥型电路的主电路元器件参数的计算	158
6.2.4	反激型电路的主电路元器件参数的确定	172
6.3	热设计和结构设计	175
6.3.1	开关器件和二极管的热设计	175
6.3.2	变压器和电抗器的热设计	176
6.3.3	机箱结构的设计	179
6.4	电磁兼容性设计	180
6.4.1	降低电磁干扰	180
6.4.2	降低电磁敏感性	184
6.5	小结	185
	参考文献	185
第7章	开关电源控制系统的原理	186
7.1	开关电路的建模	186
7.1.1	理想开关模型	187
7.1.2	状态空间平均模型	189
7.1.3	小信号模型	191
7.2	系统的传递函数	192
7.2.1	开关电路	192
7.2.2	PWM 环节	199
7.2.3	调节器	199
7.3	基于小信号模型的分析方法	201
7.3.1	系统的稳定性	201
7.3.2	动态指标	205

7.4	电压模式控制和电流模式控制	206
7.4.1	电压模式控制	207
7.4.2	峰值电流模式控制	208
7.4.3	平均电流模式控制	211
7.5	并机均流控制的原理	213
7.6	小结	219
	参考文献	219
第 8 章	控制电路的设计	221
8.1	控制电路结构和主要组成部分的原理	221
8.1.1	驱动电路	221
8.1.2	调节器电路	222
8.1.3	并机均流电路	222
8.1.4	保护电路	222
8.1.5	PWM 控制电路	224
8.2	电压模式控制电路的设计	242
8.2.1	电压调节器结构形式	242
8.2.2	电压调节器的参数	244
8.3	峰值电流模式控制电路的设计	247
8.4	平均电流模式控制电路的设计	249
8.5	小结	251
	参考文献	251
第 9 章	功率因数校正技术	253
9.1	谐波和功率因数的定义	253
9.2	开关电源的功率因数校正技术	256
9.3	单相功率因数校正电路	258
9.3.1	基本原理	258
9.3.2	主电路参数的计算	260
9.3.3	单相功率因数校正电路的控制电路	262
9.4	三相功率因数校正电路	264
9.5	软开关 PFC 电路	266

9.6 单级功率因数校正技术	267
9.6.1 单相单级 PFC 变换器	268
9.6.2 三相单级 PFC 变换器	273
9.7 小结	277
参考文献	277