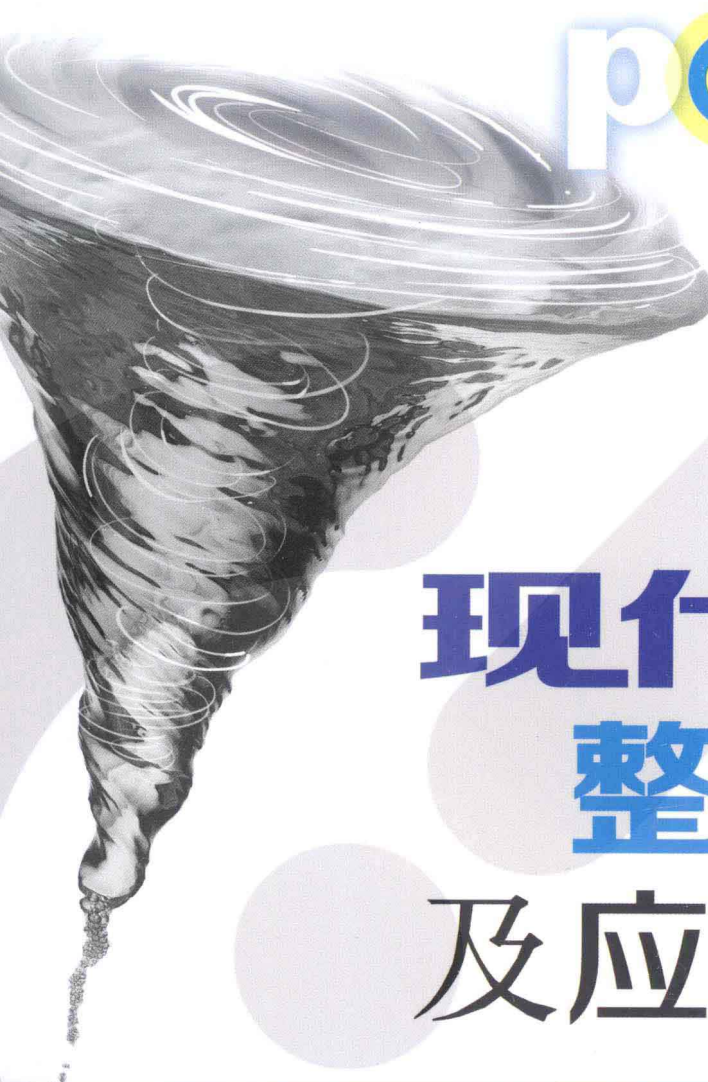




power
supply

现代电源技术精品系列

现代 整流技术 及应用实例

• 刘凤君 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

现代电源技术精品系列

现代整流技术及应用实例

刘凤君 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



内 容 简 介

本书全面详细地介绍了采用隔离型整流变压器与非隔离型自耦整流变压器的各种工频整流器,采用IGBT作开关的各种三相PWM PFC整流器及各种三相SPWM PFC高频开关式整流器的原理与应用,分析的重点是如何提高输入功率因数、整流效率及减小体积重量和成本。

本书特点:技术新,采用了物理概念和数学分析相结合的方法。

本书可作为专业技术人员的设计参考用书,也可作为高等院校电力电子、工业自动化等专业的本科高年级学生及研究生的教学参考书,并适合从事电力电子技术研究的广大科技人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代整流技术及应用实例/刘凤君编著. —北京:电子工业出版社, 2013. 9

(现代电源技术精品系列)

ISBN 978-7-121-21197-3

I. ①现… II. ①刘… III. ①整流器 IV. ①TM461

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第182618号

策划编辑:张 榕

责任编辑:侯丽平

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:22.5 字数:582.4千字

印 次:2013年9月第1次印刷

印 数:4 000册 定价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

整流器是一种将交流电能转换成直流电能的电能形态变换器,是最早出现的一种电力电子器件。

由整流器得到的直流电能可以直接用于向直流负载供电,也可以将直流电能用逆变器再将它转换成不同频率、不同质量的可控可调的另一种交流电能向负载供电。在当前的情况下,后一种应用方式要多于前一种应用方式。

随着工业和科学技术的发展,用户对电能质量的要求越来越高,目前市电电网的电能质量存在储多的缺点。例如,电能质量差,电压波动大;市电是一种公共电源,受环境影响及其他负载变化的影响大;不能进行控制或调节;不能对市电进行某一用户所需的保护等,不能满足用户的要求,必须经过再加工后才能满足用户的使用要求。因此整流与逆变在这种电能再加工中将起到重要作用,是必须采用的两项技术。有人预计:21 世纪,整流与逆变技术将会对工业自动化、交通运输、城市供电、节能、治理环境污染等方面的发展产生巨大的推动作用。所以说整流技术是电力电子学中的一项重要技术,也是应用最多的一项技术。

但是,由于对整流技术的重视程度不够,使这项技术的发展落后于使用发展的速度。因此整流器在对市电电网再加工的过程中,也变成了市电电源的污染源。

当前,传统的整流器存在以下缺点:

- 市电输入电流的谐波含量高;
- 市电输入功率因数低,一般在 0.6 ~ 0.8 之间;
- 对市电电网有较强的谐波污染,使市电电压发生畸变;
- 使市电输入电流额定值增大,使整流效率降低。

我国国家技术监督局已颁布了 GB/T 14549—1993《电能质量·公用电网谐波》标准,国际电工委员会也于 1988 年对谐波标准 IEC 555-2 进行了修订。制定了 IEC 1000-3-2 标准,传统的整流器已不再符合新规定,面临不能继续使用的危险。

抑制整流器谐波、提高市电输入功率因数的办法有两种:一种是被动法,即采用无源或有源滤波器来旁路或抑制谐波;二是主动法,即设计出输入电流为正弦波、谐波含量低、输入功率因数高的整流器。本书将介绍一些应用较多、电路比较简单的方法。

逆变器对整流器的要求与单独使用的整流器的要求既有相同点,也有不同点:相同点是市电输入电流的谐波含量要小、市电输入功率因数要高、整流效率要高;不同点是逆变器对整流器的电能质量要求比单独使用的整流器要低,但要求整流器必须满足逆变器的工作特点,如输出保持能力和启动浪涌电流的抑制等。此外还要求整流器的电路要简单可靠。

本书将介绍以下几个方面的内容:无源功率因数校正、等幅值多重叠加式多相工频整流器;变幅值多重叠加式多相工频整流器;谐波注入式工频整流器;采用自耦变压器的多重叠加式多相工频整流器;多相多重叠加式工频整流器的控制方式;三相 PWM PFC 整流器;三相高频 IGBT SPWM PFC 整流器;三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器;三相六开关电流型

Buck SPWM 高频整流器;三相三交流开关高频整流器;三相三直流开关 SPWM Boost/Buck 高频整流器;三相六直流开关单向 Boost SPWM 高频整流器;SPWM 多电平整流器等,以及这些整流器的应用举例。

作者想通过本书的论述,对现有的各种典型的整流器进行全面深入的介绍。但这项技术所涉及的是一个发展速度很快的技术领域,所包含的内容较广、较深,作者虽竭尽全力,但由于水平有限,书中内容难免有不足和错误之处,敬请广大读者批评指正,在此表示衷心的感谢!

编著者

第 1 章 绪论	1
1.1 二极管桥式整流器的基本电量关系	1
1.1.1 桥式整流器的基本电量关系	2
1.1.2 整流器的滤波器参数	8
1.2 整流器的性能指标	10
1.2.1 通用性能指标	10
1.2.2 满足逆变器要求的专用性能指标	12
1.3 二极管桥式整流器的输入电流谐波与输入功率因数	15
1.3.1 整流器采用电感滤波时的输入电流谐波与功率因数	15
1.3.2 整流器采用电容滤波时的输入电流谐波与功率因数	16
1.4 在整流器与滤波电容之间串入电感提高功率因数	23
1.4.1 单相桥式整流器	24
1.4.2 三相桥式整流器	28
1.5 在整流器输入端加入无源 LC 串并联槽路	30
1.5.1 单相桥式整流电路	31
1.5.2 三相桥式整流电路	32
1.5.3 用直流电感校正与用 LC 槽路校正的对比	34
1.6 整流器调压用开关器件	35
1.6.1 SCR 晶闸管	36
1.6.2 可关断晶闸管 GTO	37
1.6.3 绝缘栅双极晶体管 IGBT	39
1.6.4 集成门极晶闸管 IGCT	40
1.6.5 开关器件的选择	40
1.7 整流器的效率与负载率的关系	42
1.8 整流器开关管的开关损耗	44
1.9 三相半桥式 SPWM 逆变器的双向工作与输出表示式	45
1.9.1 A 相输出电压 u_{PA} 的表示式	47
1.9.2 B 相输出电压 u_{PB} 的表示式	50
1.9.3 线电压 u_{PAPB} 的表示式	50
1.9.4 双向工作的输出表示式	51
1.10 三相半桥式 SPWM 整流器的串联与并联叠加	54
1.10.1 三相半桥式 SPWM 整流器的串联级联叠加	54
1.10.2 三相半桥式 SPWM 整流器的并联级联叠加	56

第2章 采用整流变压器的多相工频整流器	58
2.1 多相工频整流器的定义、分类及特点	58
2.2 多相工频变压器的构成原理	59
2.3 等幅值多重叠加式多相工频整流器	66
2.3.1 等幅值12相二重叠加工频整流器	68
2.3.2 等幅值18相三重叠加工频整流器	69
2.3.3 等幅值24相四重叠加工频整流器	70
2.4 变幅值多重叠加式多相工频整流器	72
2.4.1 确定变压器变比 A_t 的计算法	74
2.4.2 变幅值12相二重叠加工频整流器	76
2.4.3 变幅值18相三重叠加工频整流器	78
2.4.4 变幅值24相四重叠加工频整流器	81
2.5 谐波注入式工频整流器	84
2.5.1 采用平衡电感次级注入谐波的12相整流器	84
2.5.2 采用变压器注入谐波的12相二极管整流器	87
2.6 采用自耦变压器的多重叠加式多相工频整流器	90
2.6.1 采用自耦变压器的12相二重叠加工频整流器	90
2.6.2 采用自耦变压器的18相三重叠加工频整流器	95
2.6.3 采用自耦变压器的24相四重叠加工频整流器	100
2.6.4 采用移相分流器再级联型24相自耦变压工频整流器	105
2.6.5 采用平衡电感的24相自耦变压器式工频整流器	107
2.6.6 采用谐波注入的24相自耦变压器式工频整流器	117
2.7 多相多重叠加式工频整流器的控制方式	118
2.7.1 SCR多相相控整流器	118
2.7.2 GTO U_{dc} -PWM控制整流器	125
第3章 三相PWM PFC整流器	137
3.1 三相PWM DCM PFC整流器	137
3.1.1 基于Boost输入型PWM DCM高功率因数三相整流器	137
3.1.2 三相PWM DCM Buck PFC整流器	144
3.2 采用恒频PWM控制的三相Boost PFC整流器	148
3.2.1 设计参数计算	152
3.2.2 设计举例	154
3.3 谐波注入式三相Boost PWM PFC整流器	154
3.4 变频PWM控制的三相Boost PFC整流器	160
3.5 固定开关频率与可变开关频率PFC整流器的比较	162
3.6 两个三相Boost PWM PFC整流器的交错并联	164
第4章 三相高频IGBT SPWM PFC整流器	166
4.1 三相高频IGBT SPWM PFC整流器的定义、分类与特点	166

4.2	三相高频 IGBT SPWM PFC 整流器的基础知识	168
4.2.1	单相 Boost SPWM PFC 电路	168
4.2.2	单相 Buck SPWM PFC 电路	174
4.3	单相电压型 Boost 与电流型 Buck SPWM 高频整流器	180
4.3.1	单相电压型 Boost IGBT SPWM 高频整流器	180
4.3.2	单相电流型 Buck IGBT SPWM 高频整流器	192
4.4	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器	193
4.4.1	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的工作原理	193
4.4.2	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的参数计算	203
4.4.3	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的控制	207
4.4.4	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的一些常用控制法	213
4.4.5	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的并联叠加技术	218
4.5	三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器	225
4.5.1	电流型 Buck SPWM 高频整流器与电压型 Boost SPWM 高频整流器的对偶性	225
4.5.2	一种三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器	227
4.5.3	另一种节能型三相六开关 Buck SPWM 高频整流器	236
4.5.4	三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器的并联叠加技术	242
4.6	三相三交流开关高频整流器	246
4.6.1	三相三交流开关 SPWM 控制的 Y 与 Δ 接法高频整流器	246
4.6.2	滞环控制典型三相三交流开关 Δ 连接式 Boost 高频整流器	253
4.6.3	三相三交流开关三电平 Boost 高频整流器	259
4.7	三相三直流开关 SPWM Boost/Buck 高频整流器	262
4.7.1	三相三直流开关转输电感式 Boost SPWM 高频整流器	263
4.7.2	三相三直流开关 Buck SPWM 高频整流器	264
4.7.3	单极性 SPWM 控制的电感转输式 Boost 高频整流器	265
4.8	三相六直流开关单向 Boost SPWM 高频整流器	271
4.9	单相 PSCPWM Boost PFC 并联叠加式三相整流器	277
4.10	SPWM 多电平整流器	281
4.10.1	二极管钳位三电平逆变器	281
4.10.2	二极管钳位三电平逆变器的输出电压表示式	283
4.10.3	二极管钳位三电平逆变器的双向四象限工作	286
4.10.4	二极管钳位三相三电平 SPWM 整流器	287
第5章	应用举例	291
5.1	在 5 个 2H 桥级联式变频器中的应用	291
5.1.1	30 相等幅值多重叠加整流器	291
5.1.2	5 个 2H 桥级联叠加 11 电平逆变器	294
5.2	在 3 个和 6 个 2H 桥级联式变频器中的应用	298
5.2.1	日本东芝公司生产的 TOSVERT - MV 变频器	298
5.2.2	日本三菱电机公司的 PMT - F500HV 变频器	302

5.3	对 2H 桥级联式变频器的改进建议	303
5.3.1	具有隔离功能 2H 桥级联式变频器的改进	304
5.3.2	无隔离功能的 2H 桥级联式变频器的改进	308
5.4	对工频 UPS 的改进	316
5.4.1	采用 U_{dc} - PWM 控制的 12 相工频整流器	317
5.4.2	采用 U_{dc} - PWM 控制的派生多相整流器	321
5.5	平衡电感式 24 相自耦变压整流器在 UPS 中的应用	324
5.5.1	24 相自耦变压整流器的输入功率因数与容量	324
5.5.2	与 24 相自耦变压整流器配套的逆变器	326
5.5.3	自耦变压器减小了负载率对 UPS 效率的影响	327
5.5.4	与当前工频或高频 UPS 整流器的性能比较	329
5.6	对高频 UPS 的改进	330
5.6.1	IGBT 高频 Boost PFC 整流器的 SPWM 控制	330
5.6.2	用线电压 u_{pab} 、 u_{pbc} 、 u_{pca} 作驱动信号的节能控制	332
5.6.3	采用单极性 SPWM 相电压作驱动信号的节能控制	334
5.6.4	高频整流器两种节能控制的比较	336
5.7	高频无变压器 SPWM 软开关 UPS	337
5.7.1	无源 LCD 无损缓冲电路	339
5.7.2	有源 LCD 无损缓冲电路	342
5.7.3	结实型准谐振纯软开关式 UPS	343
5.8	高频 UPS 的级联叠加	346
5.8.1	级联叠加方式	347
5.8.2	级联叠加电路	347
参考文献		352

第 1 章

绪 论

本章将介绍一些在整流器中不便于重复介绍而又与整流器密切相关的一些通用技术或基础知识,例如二极管桥式整流器的基本电量关系、整流器的性能指标、整流器的输入电流畸变率 THDI 与输入功率因数 PF 的定义、整流器的滤波与无源功率因数校正法、可控整流所用的开关器件、整流器的效率与负载率的关系、开关整流器的开关损耗计算等,以及一些设计者与使用者非常关心的问题。

1.1 二极管桥式整流器的基本电量关系

由于多数逆变器(特别是 PWM 逆变器)其本身可以调压,所以适合于逆变器使用的整流器是采用二极管整流的单相和三相桥式整流器,两者的主要性能参数见表 1-1。由表 1-1 可知,三相桥式整流器的利用系数比单相桥式整流器高,而且纹波系数比单相桥式整流器低。这样,对于逆变器来说,特别是对中、大功率的逆变器,多数采用三相桥式整流器。三相桥式整流器的二极管利用率也比较合理。但在三相桥式整流电路中,实际的直流输出电压比理想值低,这是由于整流二极管的正向管压降或输入整流变压器一、二次绕组的电阻以及整流变压器漏感引起的整流二极管换相时产生的换相损耗造成的。所谓换相损耗,如图 1-1 所示,它主要是由输入整流变压器的漏感造成的。漏感阻止电流从一相转换到另一相,造成在某一段时间内两个相邻相二极管同时导通,此时整流输出直流电压是两相邻导通相电压瞬时值的平均值,因而降低了输出电压。

表 1-1 单相和三相桥式整流器的主要性能参数

参 数	单 相 桥 式	三 相 桥 式
整流管承受的反向最高工作电压 U_R	$1.57U_o$	$1.05U_o$
变压器的二次电压 U_2	$1.11U_o$	$0.428U_o$
变压器的二次电流 I_2	$1.11I_o$	$0.816I_o$
二次绕组利用系数 K_2	0.813	0.95
纹波基频频率 f_r	$2f$	$6f$
纹波系数 ρ	47.2%	4%

二极管正向压降引起的电压降 ΔU_1 为

$$\Delta U_1 = nU_D$$

式中 n ——串联应用的二极管数;

U_D ——二极管的正向压降。

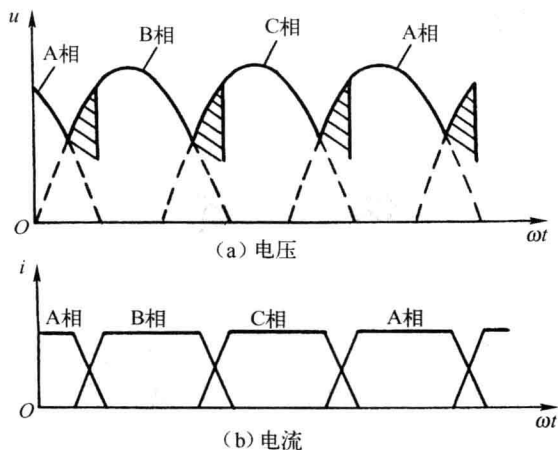


图 1-1 由于变压器漏感引起的换相过程

输入变压器绕组电阻引起的电压降 ΔU_2 为

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta P}{I_d}$$

式中 ΔP ——变压器绕组铜损；

I_d ——整流器输出电流。

换相引起的电压降为

$$\Delta U_3 = \frac{NX_L I_d}{2\pi}$$

式中 N ——相数；

X_L ——变压器漏感抗。

以上三者引起的总电压降 ΔU 为

$$\Delta U = nU_D + \frac{\Delta P}{I_d} + \frac{NX_L I_d}{2\pi}$$

考虑总电压降的直流输出电压为

$$U_{do'} = U_{do} - \Delta U = U_{do} - nU_D - \frac{\Delta P}{I_d} - \frac{NX_L I_d}{2\pi}$$

1.1.1 桥式整流器的基本电量关系

本节的数据是在如下简化的条件下算出的：

- 不计输入整流变压器的损耗；
- 不计换相电抗引起的电压降(重叠角未计)；
- 负载为纯电阻。

1. 对于单相桥式整流电路 单相桥式整流电路的基本电量关系如图 1-2 和图 1-3 所示。

前者是单相全波电路,后者是单相桥式电路。

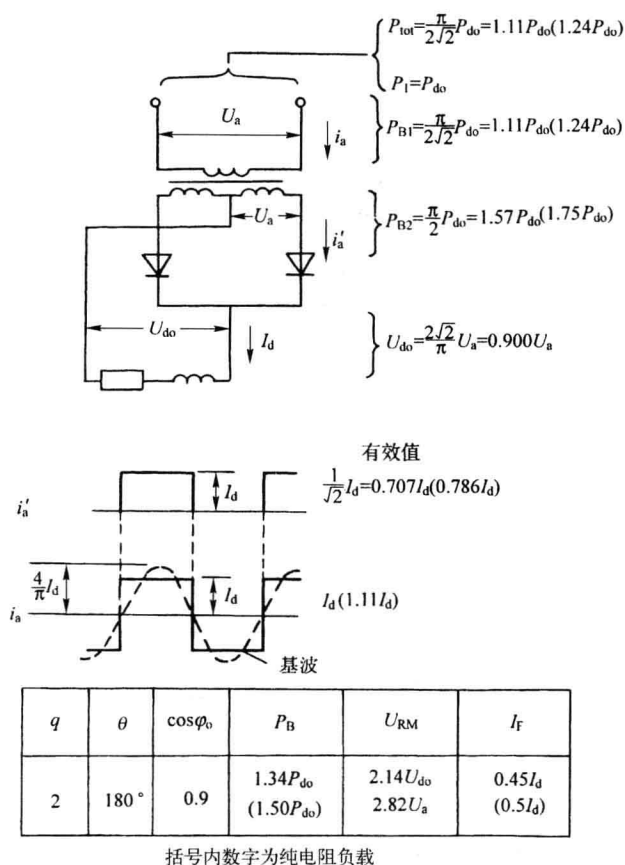


图 1-2 单相全波整流器的基本电量关系

图中符号的含义为:

U_{d0} ——空载时直流电压的平均值;

U_a ——整流变压器二次相电压的有效值;

I_d ——直流电流的平均值;

P_{d0} ——理想直流功率 $P_{d0} = U_{d0} I_d$;

P_{B1} ——整流变压器一次视在功率(容量),未计效率,重叠角为零;

P_{B2} ——整流变压器二次视在功率(容量),重叠角为零;

P_B ——整流变压器整体的视在功率(容量),未计效率,重叠角为零, $P_B = (P_{B1} + P_{B2})/2$;

P_{tot} ——从电网吸收的总视在功率(容量),未计变压器效率,重叠角为零;

P_1 —— P_{tot} 中基波分量的使用功率,未计变压器效率,重叠角为零;

q ——整流电压波形中每周期内的脉动次数;

θ ——每一整流二极管每次导通时的导通角;

$\cos\varphi_0$ ——线路功率因数,未计变压器效率,重叠角为零, $\cos\varphi_0 = P_{d0}/P_{tot}$;

U_{RM} ——整流二极管所承受的最大反向峰值电压(瞬时值),所选用的硅整流器件的额定

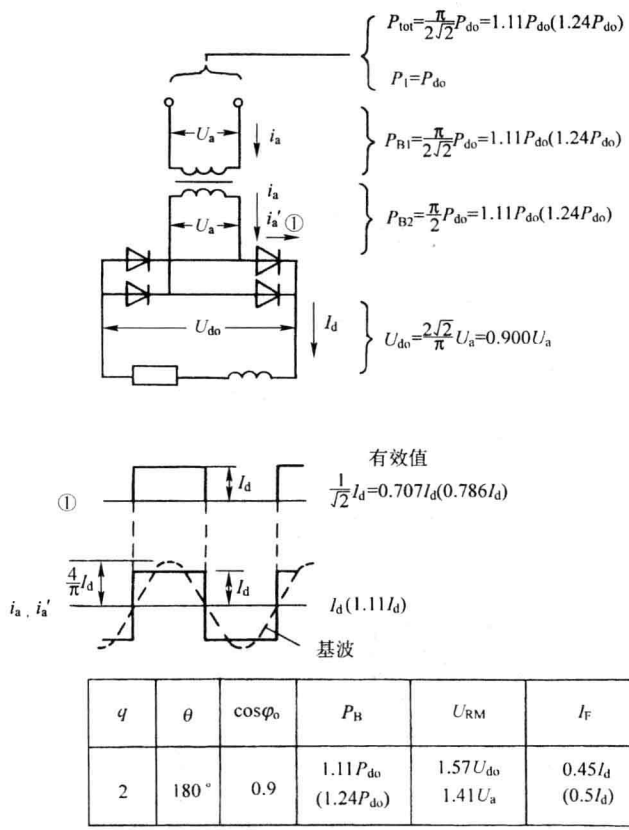


图 1-3 单相桥式整流器的基本电量关系

反向峰值电压 U_{NRM} 为 $U_{NRM} = 2 \times 1.1 \times U_{RM} - 100 (V)$;

I_F ——所选用整流二极管的最小额定平均电流,生产厂所规定的整流二极管额定平均电流系指通以单相正弦半波电流时所允许的正向电流平均值。对于这种波形,其有效值与平均值之比为 1.57。通以其他波形电流时,需根据有效值相当来进行折算。

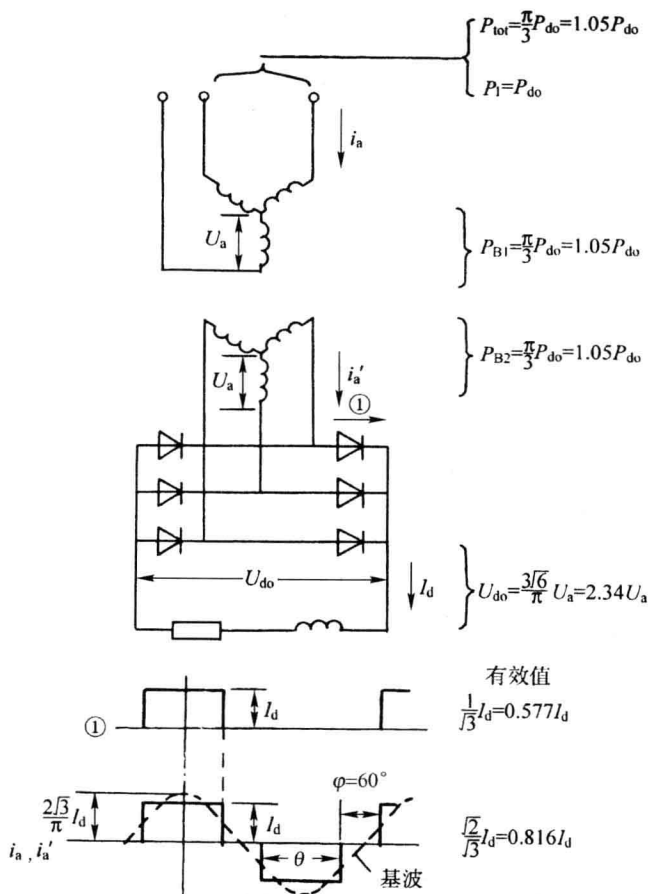
变压器一次电流的数值,应根据查出的数值,除以一次相电压和二次相电压的电压比。纯电阻负载时的数据,用括号列在有关表内。

2. 对于三相桥式整流电路 三相桥式整流电路的基本电量关系如图 1-4 ~ 图 1-7 所示。其中图 1-4 是变压器采用 Y/Y 联结的三相桥式整流器;图 1-5 是变压器采用 Δ/Y 联结的三相桥式整流器;图 1-6 是变压器采用 Y/ Δ 联结的三相桥式整流器;图 1-7 是变压器采用 Δ/Δ 联结的三相桥式整流器。

图中符号的含义与单相桥式整流电路相同,这里不再重复。

变压器一次电流的数值应根据查出的数值除以一次相电压和二次相电压的电压比。例如图 1-5 变压器采用 Δ/Y 联结的三相桥式整流电路,如二次相电压 $U_2 = 100V$,一次线电压为 $380V$,电压比为 $380/\sqrt{3}:100 = 2.2$,则其一次相电流③或 i_a 的有效值等于 $0.471 I_d/2.2$ 。

三相桥式整流电路纯电阻负载时的数据与无穷大电感负载时的数据相差不大,故不再特别列出。



q	θ	$\cos \varphi_0$	P_B	U_{RM}	I_F	电路特征
6	120°	0.955	$1.05 P_{do}$	$1.045 U_{do}$ $2.45 U_a$	$0.367 I_d$	三相桥式 Y/Y

图 1-4 变压器采用 Y/Y 联结的三相桥式整流器

对于电流 I_F 的计算: I_F 是所选用硅整流二极管的最小额定平均电流, 生产厂所规定的硅整流二极管的额定平均电流系指通以单相正弦半波电流时所允许的正向电流平均值。对于这种波形, 其有效值与平均值之比为 1.57。通以其他波形电流时, 需根据有效值相当来进行折算。如对方图 1-5 所示的变压器采用 Δ/Y 联结的三相桥式整流电路, 查出流过整流二极管的电流①有效值为 $0.577 I_d$, 根据有效值相当, $0.577 I_d = 1.57 I_F$, 故 $I_F = 0.367 I_d$ 。本节图、表中的 I_F 就是这样计算出来的。

由图 1-4 ~ 图 1-5 可知: 不管变压器采用 Y/Y、 Δ/Y 、Y/ Δ 或 Δ/Δ 联结, 流入三相桥式二极管整流器的电流 i_a' 都是脉宽为 120° 的方波电流。这说明, 流入三相二极管整流器的电流与变压器的联结方式无关, 而只取决于三相二极管桥式整流器。这个结论很重要, 它是第 2 章中, 简化自耦变压整流器分析和推导计算式的关键依据。下面推导三相二极管桥式整流器输入电流 i_a' 的傅里叶级数表示式。

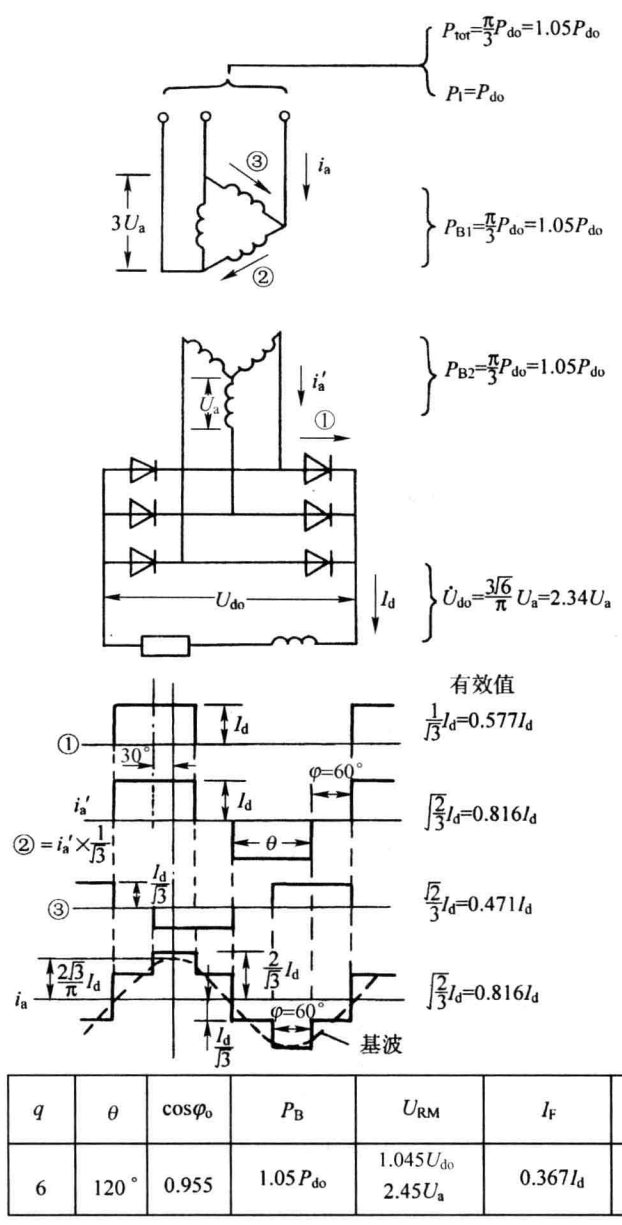


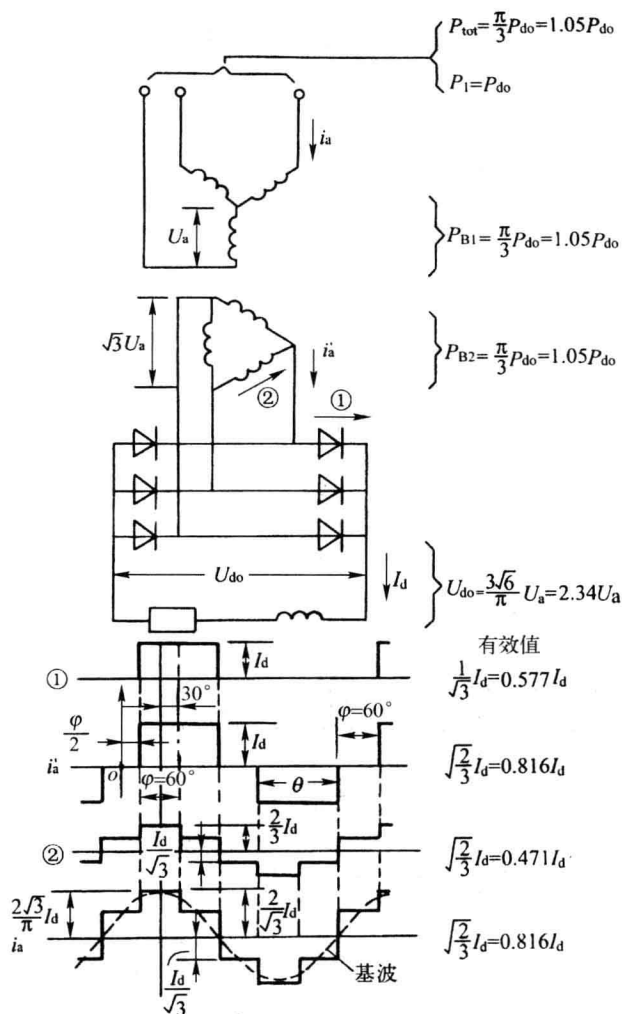
图 1-5 变压器采用 Δ/Y 联结的三相桥式整流器

i'_a 的傅里叶级数表示式为

$$i'_a = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} I'_{amn} \cdot \sin(n\omega t)$$

式中幅值 I'_{amn} 的求法有两种,一种是用 ϕ 表示,另一种是用 θ 表示,如图 1-6 和图 1-7 所示。

① 用 ϕ 表示:



q	θ	$\cos \varphi_0$	P_B	U_{RM}	I_F	电路特征
6	120°	0.955	$1.05 P_{\text{do}}$	$\frac{1.045 U_{\text{do}}}{2.45 U_a}$	$0.367 I_d$	三相桥式 Y/Δ

图 1-6 变压器采用 Y/Δ 联结的三相桥式整流器

$$I'_{\text{amn}} = \frac{4}{\pi} \int_{\varphi/2}^{\pi/2} I_d \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(n\omega t) = \frac{4I_d}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\varphi}{2}$$

$$i'_a = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\varphi}{2} \cdot \sin(n\omega t) \quad (1-1)$$

② 用 θ 表示:

$$I'_{\text{amn}} = \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\theta}{2}}^{\pi/2} I_d \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(n\omega t) = \frac{4I_d}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\theta}{2}$$

$$i'_a = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\theta}{2} \cdot \sin(n\omega t) \quad (1-2)$$

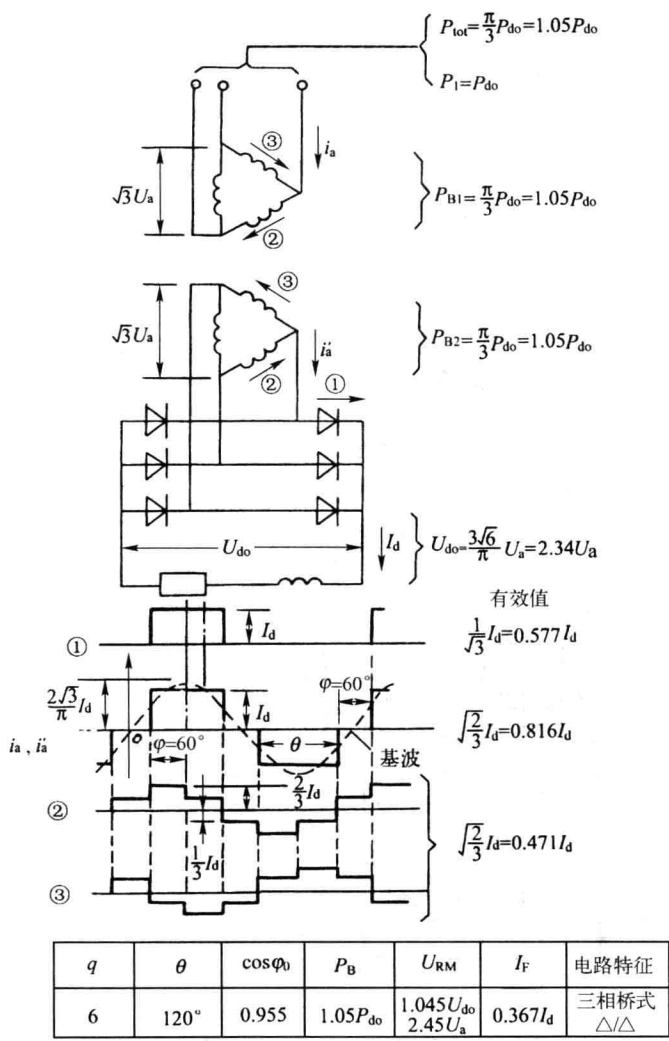


图 1-7 变压器采用 Δ/Δ 联结的三相桥式整流器

1.1.2 整流器的滤波器参数

滤波的目的是为了减小输出电压或输出电流的脉动,使其被限制在某一给定的允许范围内。逆变器整流电源的滤波器有两种,一种是用于电压型逆变器的电容滤波器,另一种是用于电流型逆变器的电感滤波器。

1. 电容滤波器 电容滤波器根据整流器的形式,可以分为单相和三相两种。

对于图 1-2 和图 1-3 所示的单相全波和单相桥式整流器,在其输出端直流电压 U_{do} 中,含有二次谐波的脉动电压 $U_{d(2)}$ 。直流滤波电容的电抗值为

$$Z_{c(2)} = \frac{1}{2\omega C_d}$$

式中 ω ——市电网的角频率,当 $f=50\text{Hz}$ 时, $\omega=314\text{rad/s}$ 。