

电力电子 整流技术及应用



© 曲学基 曲敬铠 于明扬 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

TM461/2

2008

电力电子整流技术及应用

曲学基 曲敬铠 于明扬 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书重点介绍了半导体二极管不可控整流电路、晶闸管相控整流电路、功率场效应管和绝缘栅双极晶体管作为整流器件的 PWM 整流电路。对各种整流器件的结构、特性和参数,以及相应的驱动(触发)电路也做了较详细的介绍。为了便于设计人员设计整流电路,本书还给出了国内外部分整流器件的模块、变压器和电感器的设计等内容。作为整流技术的应用,本书专列一章介绍某些专用整流器。本书是一本详细、全面论述电力电子整流技术实用性很强的书籍。

本书可作为高等院校的电力电子和电力传动专业及其有关专业师生的参考书,也可供从事整流技术研究和电力电子设备设计应用的工程技术人员参考。

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

电力电子整流技术及应用/曲学基等编著. —北京:电子工业出版社,2008.4

ISBN 978-7-121-06238-4

I. 电… II. 曲… III. 整流器 IV. TM461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 036754 号

责任编辑:魏永昌 特约编辑:李云霞

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:24.75 插页:1 字数:640 千字

印 次:2008 年 4 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:45.00 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 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

电能的变换电路有 AC/DC、DC/DC、DC/AC 和 AC/AC 四种。其中,AC/DC 变换电路俗称整流电路,它是将交流电能变换为直流电能的电路。整流电路可以直接为要求较低的电力电子装置提供直流电能。在大多数情况下,整流电路作为电网与电力电子装置的接口电路,构成直流稳压电源,为电力电子装置提供高质量的直流电能。

整流电路的发展可以分为四个阶段:

- (1) 旋转式变流机组,即电动机—发电机组。
- (2) 电子管和离子管整流器。
- (3) 半导体二极管整流器。
- (4) 可控整流器。其中包括晶闸管构成的相位控制型整流器和 VMOSFET、IGBT 构成的 PWM 控制型整流器。

本书仅对半导体二极管整流器和可控整流器给予重点介绍。

随着半导体器件制造工艺的高速发展,相继出现了整流二极管、晶闸管、VMOSFET、IGBT 等单、双管和整流桥模块,使电力电子整流器的设计、调试、组装和维修更加简单化。

本书共分 8 章。第 1 章为概述。主要介绍了整流技术的发展和现状,以及各类整流器中存在的共性问题(如整流器的主要参数、整流器的谐波效应、整流器的热效应和散热设计等)。第 2 章为半导体二极管整流器。重点介绍了半导体二极管的伏-安特性和主要参数、单相和多相二极管整流电路,另外,给出了部分国内外生产的二极管模块的性能参数。第 3 章为晶闸管整流电路。本章在对晶闸管的工作原理、伏-安特性、串并联和过压过流保护等加以简单介绍之后,重点介绍了各种晶闸管整流电路,对这些整流电路的性能做了比较,并集中给出了各种晶闸管整流电路的参数的计算公式。最后,给出部分国内生产的晶闸管模块的性能参数。第 4 章为 PWM 整流电路。由 PWM 控制的整流电路是当代最先进的整流技术。PWM 整流器及其控制技术的发展与大功率开关器件的高速发展是密不可分的。为了便于工程技术人员设计 PWM 整流器,本章介绍了 PWM 整流器中常用做整流器件的 VMOSFET 和 IGBT,以及它们的模块。本章的重点是各类 PWM 整流电路的电路结构和控制方案的工作原理。第 5 章为具有有源滤波功能的整流器。市电电网输入的非正弦波电流会使整流电路的功率因数大大降低;反之,整流器件的开关过程也会对电网造成污染。解决该问题的办法是滤波。前几章介绍的整流电路均有滤波功能,但主电路和控制电路比较复杂。本章介绍的整流电路具有输入电流的无源整形或有源整形功能,主电路和控制电路都比较简单。第 6 章为驱动(触发)电路。驱动(触发)电路是电力电子变换器的关键技术。本章重点介绍了晶闸管、VMOSFET、IGBT 的驱动(触发)电路,并给出了部分集成驱动(触发)器。第 7 章为专用整流器。本章介绍了几种专用整流器,以此说明整流电路在电力电子技术领域中的应用。第 8 章为变压器和电感器的设计。整流电路中是离不开变压器和电感器的,许多讲述电路结构的专业书籍中,少有介绍变压器和电感器的设计。在论述整流技术时,考虑到整流电路的完整性,有必要对整流电路中常用的变压器和电感器给予重点介绍。

整流技术的发展历史已有近一个世纪了,但至今仍没有一本完整介绍整流技术的书籍。期望本书可以填补这一空白。

本书由曲学基、曲敬铠、于明扬等编著,在编写过程中得到众多同事和朋友的支持,他们在资料收集、整理方面做了大量工作,特别是电子工业出版社的魏永昌编审,为本书的出版倾注了巨大的精力,在此一并表示感谢。

由于编者能力有限,难免出现错误和不妥之处,请广大读者予以指正。

编 著 者

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 整流技术的发展和现状	(1)
1.2 整流器的主要参数	(2)
1.2.1 空载输出直流电压 U_{d0}	(2)
1.2.2 额定输出直流电压 U_{dN}	(4)
1.2.3 整流效率 η_R 和整流因数 K_R	(4)
1.2.4 功率因数	(4)
1.2.5 直流电压调整值和直流电压调整率 d	(5)
1.3 整流器的谐波效应	(7)
1.4 整流器的热效应和散热设计	(11)
1.4.1 元器件的散热设计	(12)
1.4.2 散热器的选用	(14)
1.4.3 印制电路板的散热设计	(15)
1.4.4 机箱的散热设计	(16)
第 2 章 半导体二极管整流器	(21)
2.1 半导体二极管	(21)
2.1.1 半导体二极管的伏-安特性	(21)
2.1.2 半导体二极管的主要参数	(22)
2.2 半导体二极管整流电路	(24)
2.2.1 单相二极管整流电路	(24)
2.2.2 多相二极管整流电路	(30)
2.3 半导体二极管模块	(35)
2.3.1 半导体二极管模块的主要参数	(36)
2.3.2 单、双二极管模块	(36)
2.3.3 单相全桥二极管整流模块	(39)
2.3.4 三相半桥二极管整流模块	(41)
2.3.5 三相全桥二极管整流模块	(42)
第 3 章 晶闸管整流电路	(45)
3.1 晶闸管	(45)
3.1.1 晶闸管的工作原理	(45)
3.1.2 晶闸管的伏-安特性	(47)
3.1.3 晶闸管的串/并联	(61)
3.1.4 晶闸管的保护	(67)
3.2 晶闸管整流电路	(78)
3.2.1 单相半波晶闸管可控整流电路	(78)

3.2.2	单相全波晶闸管可控整流电路	(84)
3.2.3	单相桥式晶闸管可控整流电路	(87)
3.2.4	单相桥式晶闸管不控整流电路	(94)
3.2.5	二相零式晶闸管整流电路	(95)
3.2.6	二相式晶闸管整流电路	(96)
3.2.7	三相半波晶闸管可控整流电路	(96)
3.2.8	三相桥式晶闸管可控整流电路	(99)
3.2.9	多相晶闸管可控整流电路	(103)
3.2.10	双Y平衡晶闸管可控整流电路	(105)
3.2.11	三相不可控桥和三相晶闸管可控桥串联的可控整流电路	(105)
3.3	晶闸管整流电路输出电压的脉动	(106)
3.4	各种晶闸管整流电路的比较和参数的计算	(108)
3.5	晶闸管模块	(108)
3.5.1	晶闸管模块的主要参数	(109)
3.5.2	普通单、双晶闸管模块	(109)
3.5.3	普通晶闸管/整流管模块	(111)
3.5.4	单相半控桥晶闸管模块和单相全控桥晶闸管模块	(114)
3.5.5	单相半控桥+整流管模块和单相全控桥+整流管模块	(116)
3.5.6	三相半控桥晶闸管模块和三相全控桥晶闸管模块	(119)
3.5.7	三相半控桥+整流管模块和三相全控桥+整流管模块	(120)
第4章	PWM 整流电路	(123)
4.1	功率场效应晶体管(VMOSFET)	(123)
4.1.1	VMOSFET的基本结构和工作原理	(123)
4.1.2	VMOSFET的技术参数	(127)
4.1.3	VMOSFET的外形和分类	(129)
4.1.4	应用VMOSFET时应注意的问题	(131)
4.2	绝缘栅双极晶体管(IGBT)	(132)
4.2.1	IGBT的结构和特点	(132)
4.2.2	IGBT的基本特性	(133)
4.2.3	IGBT的主要参数	(139)
4.3	PWM 整流电路的原理和分类	(141)
4.3.1	PWM 整流电路的原理	(141)
4.3.2	PWM 整流电路的分类	(143)
4.4	单相电压型全桥式整流电路	(144)
4.4.1	电路结构和工作原理	(144)
4.4.2	控制方案和工作原理	(146)
4.5	单相电压型半桥式整流电路	(151)
4.5.1	电路结构和工作原理	(151)
4.5.2	控制方案和工作原理	(154)

4.6	单相电流型桥式整流电路	(157)
4.6.1	电路结构和工作原理	(157)
4.6.2	控制方案和工作原理	(162)
4.7	三相电压型桥式整流电路	(163)
4.7.1	电路结构和工作原理	(163)
4.7.2	控制方案和工作原理	(168)
4.8	三相电流型半桥式整流电路	(170)
4.8.1	电路结构和工作原理	(170)
4.8.2	控制方案和工作原理	(176)
4.9	VMOSFET 模块	(178)
4.9.1	VMOSFET 模块的主要参数	(178)
4.9.2	一单元 VMOSFET 模块	(178)
4.9.3	二单元 VMOSFET 模块	(179)
4.9.4	四单元 VMOSFET 模块	(181)
4.9.5	六单元 VMOSFET 模块	(182)
4.10	IGBT 模块	(183)
4.10.1	IGBT 模块的主要参数	(183)
4.10.2	一单元 IGBT 模块	(183)
4.10.3	二单元 IGBT 模块	(185)
4.10.4	四单元 IGBT 模块	(186)
4.10.5	六单元 IGBT 模块	(187)
第 5 章	具有有源滤波功能的整流器	(189)
5.1	谐波对市电电网的影响	(189)
5.2	输入电流的无源整形技术	(190)
5.2.1	单相 LC 滤波器	(190)
5.2.2	三相 LC 滤波器	(192)
5.3	单相输入电流的有源整形技术	(192)
5.3.1	升压式(Boost)APFC 整流电路	(192)
5.3.2	降压式(Buck)APFC 整流电路	(195)
5.3.3	单端反激型(Flyback)APFC 整流电路	(196)
5.4	三相输入电流的有源整形技术	(198)
5.4.1	三相 APFC 整流电路的基本电路	(199)
5.4.2	不解耦三相 APFC 整流电路	(200)
5.4.3	部分解耦三相 APFC 整流电路	(200)
5.4.4	全解耦三相 APFC 整流电路	(202)
第 6 章	驱动(触发)电路	(203)
6.1	晶闸管的触发电路	(203)
6.1.1	可变电阻触发电路	(203)
6.1.2	阻容移相桥触发电路	(203)
6.1.3	饱和电抗器触发电路	(205)

6.1.4	同步电路与定时电路	(208)
6.1.5	单晶体管触发电路	(208)
6.1.6	集成触发电路	(226)
6.2	VMOSFET 的驱动电路	(229)
6.2.1	VMOSFET 对驱动电路的要求	(230)
6.2.2	VMOSFET 的栅极驱动电路	(231)
6.2.3	集成 VMOSFET 栅极驱动电路	(237)
6.3	IGBT 的驱动电路	(240)
6.3.1	IGBT 栅极驱动应注意的问题	(241)
6.3.2	IGBT 的栅极驱动电路	(242)
第 7 章	专用整流器	(246)
7.1	电解用整流器 ^[2]	(246)
7.2	电镀用整流器	(257)
7.3	同步电机励磁用整流器	(260)
7.4	直流电动机调速用整流器	(265)
7.5	蓄电池充放电用整流器	(284)
7.6	直流弧焊机用电源	(288)
第 8 章	变压器和电感器的设计	(315)
8.1	磁性材料	(315)
8.1.1	磁性材料的基本特性	(315)
8.1.2	低频磁性材料	(320)
8.1.3	高频磁性材料	(326)
8.2	整流变压器的设计	(341)
8.2.1	工频变压器的设计 ^[2]	(341)
8.2.2	高频变压器的设计	(348)
8.3	电感器的设计	(359)
8.3.1	直流偏压电感器的设计	(359)
8.3.2	无直流偏压电感器的设计	(365)
8.3.3	空心电感器的设计	(368)
8.4	饱和电抗器的设计	(370)
8.5	平衡电抗器的设计	(373)
8.6	平波电抗器的设计	(375)
8.6.1	平波电抗器电感量的计算	(375)
8.6.2	平波电抗器的设计举例	(381)
8.7	电流互感器的设计	(384)
参考文献		(388)

第1章 概述

变换电路包括 AC/DC、DC/DC、DC/AC 和 AC/AC 四种类型,其中 AC/DC 变换电路是将交流电能变换为直流电能的电路,俗称整流电路。整流电路可以直接给电力电子装置提供直流电能,如电解用整流器在发展初期多半是采用硅二极管整流器。整流电路也可以作为市电网与电力电子装置的接口电路,与控制电路一起为电力电子装置提供高稳定性和高精度的稳压电源。

在上述四类变换电路中,整流电路是出现最早的,也是应用最广的能量转换形式,几乎所有的电力电子装置都要应用整流电路。

1.1 整流技术的发展和现状

在半导体技术未出现时,整流是用电动机—发电机组和电子管—离子管器件来完成的。随着半导体技术的出现和发展,半导体整流器在整流技术中占据统治地位。

整流技术的发展可分为四个阶段:

- (1) 旋转式 AC/DC 变换,即电动机—发电机组;
- (2) 电子管、离子管整流器;
- (3) 不可控整流器(主要指半导体二极管整流器);
- (4) 可控整流器(又有相位控制和 PWM 控制之分)。

由于旋转式 AC/DC 变换和电子管、离子管整流器的性能/价格比很低,现在已基本不被采用。取而代之的是不可控整流器和可控整流器。

不可控整流器是利用半导体二极管的单向导电性来完成整流功能的。它的特点是电路简单、可靠性高,但是由于半导体二极管的不可控性,使其应用受到限制。

可控整流器是利用晶闸管(SCR)、功率场效应晶体管(VMOS)、绝缘栅晶体管(IGBT)等大功率开关器件的半可控性或可控性来完成整流功能的。SCR 不具备自关断特性,它实际上是一个半可控器件。由 SCR 构成的整流器称为相位控制型整流器。相位控制型整流器的分类如下:

按主电路结构分 { 桥式电路
非桥式电路

按电网相数分 { 单相电路
三相电路
多相电路

由 VMOS、IGBT 等构成的整流器称为 PWM 控制型整流器。PWM 控制型整流器的分类如下:

按主电路结构分 { 桥式电路
非桥式电路

- 按电网相数分
 - 单相电路
 - 三相电路
 - 多相电路
- 按直流储能形式分
 - 电压型电路
 - 电流型电路
- 按所用功率器件分
 - 全控型电路
 - 混合型电路
- 按 PWM 开关调制方式分
 - 硬开关电路
 - 软开关电路
- 按功率因数校正电路(PFC)分
 - 无源校正电路(PPFC)
 - 有源校正电路(APFC)

PWM 控制型整流器的分类方法虽然很多,但最基本的分类方法是按直流储能形式分为电压型电路和电流型电路。因为其他分类方法的主电路结构均可以归于电压型或电流型电路结构。所以,本书按电压型和电流型电路来讨论 PWM 控制型整流器。

半导体二极管整流器发展历史较长,目前在小功率整流设备中应用较广,特别是在开路输出电压为固定值时,被广泛采用。

相控型整流器相对于 PWM 控制型整流器而言,其历史长、技术成熟、应用广泛,但对市电网和其他用电设备有较大的干扰,深控时电网侧的功率因数会大大降低,闭环控制时的动态响应较慢。这些不足之处在 PWM 控制型整流器中得以改善。

PWM 控制型整流器也称 PWM 斩波型整流器。它是大功率开关器件和 PWM 控制技术在整流器领域中的应用,是最具有发展前途的整流技术。

由于整流模块和集成控制电路的批量生产,使 PWM 控制型整流器在设计、组装、调试和维修方面更加方便,可靠性也大大提高。

1.2 整流器的主要参数

各种类型整流器的电气参数略有不同,下面介绍的参数除非指明适用对象,对不可控整流器和可控整流器都是适用的。

基本整流电路的原理图如图 1-1 所示。图中的整流电路是不可控型、半可控型或可控型整流电路, L_d 为平波电抗器的电感, R_d 为平波电抗器的电阻。

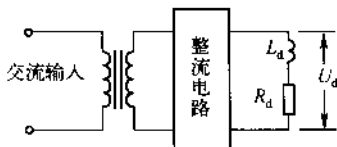


图 1-1 基本整流电路的原理图

1.2.1 空载输出直流电压 U_{d0}

1. 理想条件下的空载直流输出电压 U_{di}

理想条件下的空载直流输出电压 U_{di} 是设计整流器的基本参数值。理想条件的定义为:

(1) 整流器件为理想器件,即器件导通时的正向管压降为零,而器件关断时处于开路状态,反向电阻为无穷大。当整流器件为晶闸管时,触发延迟角 $\alpha=0$ 。

(2) 假设市电网为理想的电压源,即其内阻为零,电网电压无波动,交流电压的波形为标准正弦波,并且市电网为三相时,三相完全对称。

(3) 理想的空载条件可以认为是输出端接有一个电感量 L_d 为无穷大的电抗器,这样直流输出电流的波形为平滑的直线。

(4) 若在 PWM 控制型整流器中,采用了高频变压器,可认为变压器是一个理想变压器,即变压器的漏感和绕组电阻均为零。这样一来,励磁电流及变压器的铜损和铁损均为零,并且整流电路的换相过程瞬间便可完成。换相时不会发生电压过冲现象,也不考虑 du/dt 和 di/dt 的影响。

一般情况下,设计整流器前,仅知道额定直流输出电压 U_{dN} 。在理想条件下, $U_d = U_{dN}$ 。而在整流器的实际应用中,并不是在理想条件下,理想条件下被忽略的各种因素均需考虑进去。所以,在非理想条件下, $U_d > U_{dN}$ 。

2. 理想条件下空载直流输出电压的计算

1) 不可控型整流器理想条件下空载直流输出电压 U_{di}

$$U_{di} = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U_v \sin \frac{q}{\pi} = K_{uv} U_{v0} \quad (1-1)$$

式中 s ——整流电路串联换相组的组数;

q ——一个换相组在一个工频周期内的换相次数;

U_v ——输入变压器副边绕组的空载相电压有效值;

U_{v0} ——输入变压器副边绕组的空载线电压有效值;

K_{uv} ——整流电路的电压系数。

$$K_{uv} = \frac{sq}{\sqrt{2}\pi} \quad (1-2)$$

应该指出的是,式(1-1)和式(1-2)不适用于 $q=1$ 单相半波整流电路。

2) 不可控型和半可控型整流器非理想条件下空载直流输出电压 U_{d0} 表达式为

$$U_{d0} = \frac{U_{dN} s n_s U_T + \sum U_s}{\cos \alpha_N \left[1 - \frac{b}{100} \right] - \frac{K_X e_X}{100} - \frac{\Delta P}{P}} \quad (1-3)$$

式中 U_{dN} ——额定直流输出电压。

s ——整流电路串联换相组的组数。

n_s ——每个桥臂的串联器件数。

U_T ——在额定条件下,整流管导通状态时的电压降。

$\sum U_s$ ——附加电压降的总和,其中包括电感器和导线阻抗引起的电压降。一般情况下, $\sum U_s$ 取 $(0.2 \sim 2.5) \% U_{dN}$ 。

α_N ——在额定电网电压和额定直流电流时的触发延迟角。

b —— α_N 的补偿系数。

K_X ——变压器感抗压降折算系数。它表示变压器漏抗引起的直流电压降对变压器感抗引起的直流电压降之比。

e_X — 变压器阻抗电压中的感抗电压分量。

$\frac{\Delta P}{P}$ — 变压器损耗中的铜损在变压器总损耗中所占的比重。

式(1-3)给出了非理想空载直流输出电压 U_{d0} 与额定直流输出电压 U_{dN} 的关系。它是计算输入交流变压器原边绕组电压的依据。按式(1-3)计算得到的空载直流输出电压 U_{d0} ，可以保证在交流电网电压波动到最小值或直流输出电流不超过限定值时，仍可得到所要求的额定直流输出电压。

3. 非理想条件下引起的计算误差

上面介绍的 U_d 计算公式是在理想条件下得到的，而在非理想条件下的空载直流电压 U_{d0} 与 U_d 存在差异。表 1-1 给出了漏感 $L_s \neq 0$ 、平波电抗器的电感量 $L_d \neq \infty$ 时， U_{d0} 的计算结果（在 $L_s = 0$ 、 $L_d = \infty$ 时）与空载直流电压 U_{d0} 之间的误差。两者之间的最大误差值见表 1-1。

表 1-1 空载输出电压 U_{d0} 与理想空载电压 U_d 之间的最大误差值

直流电流的脉波数 p^*	平衡电抗器的感抗与电阻的比值 X_d/R_d	变压器漏感感抗 X_s	$(U_d - U_{d0})/U_d$
2	$(X_d/R_d) \geq 3$	$X_s = 0$	$< 11\%$
		$X_s \neq 0$	$u_d^* \leq 40$ 时, $< 13\%$
3	$(X_d/R_d) \geq 2$	$X_s = 0$	$< 11\%$
		$X_s \neq 0$	$u_d^* \leq 30\%$ 时, $< 4\%$
> 3	$(X_d/R_d) \geq 2$	$X_s = 0$	$< 0.5\%$
		$X_s \neq 0$	$u_d^* \leq 30\%$ 时, $< 7\%$

注：#： p 表示在一个工频周期里直流电压脉动次数，在基本整流电路中， p 等于一个工频周期里的换相次数 q 。

： u_d^ 表示无相位控制时的重叠角。

1.2.2 额定输出直流电压 U_{dN}

在理想条件下，整流电路的额定直流输出电压 U_{dN} 等于理想空载直流输出电压 U_d ，在非理想条件下， $U_{dN} < U_d$ ，由式(1-1)求得 U_d ，再由式(1-3)求出 U_{dN} 。而在设计整流电路之前，已给出的是额定直流输出电压 U_{dN} ，为此，应从式(1-3)中求出非理想空载直流输出电压 U_{d0} 。

1.2.3 整流效率 η_R 和整流因数 K_R

整流效率 η_R 为输出直流有功功率 $\sum P$ 与输入交流有功功率 P_{ac} 之比，即

$$\eta_R = \sum P / P_{ac} \quad (1-4)$$

式中， $\sum P = P_{dc} + P_h$ ，其中， P_{dc} 为直流输出端的直流分量产生的有功功率， P_h 为直流输出端的纹波产生的有功功率。

整流因数 K_R 为直流输出端的直流电压和直流电流的乘积 ($U_{dc} \times I_{dc}$) 与输入交流的基波有功功率 P_{ac1} 之比，即

$$K_R = U_{dc} I_{dc} / P_{ac1} \quad (1-5)$$

1.2.4 功率因数

由于市电网与负荷的相互影响，整流器的输入电流的波形是非正弦波，使整流器输入端

的功率因数不等于 1。非正弦波的输入电流对功率因数的影响由总功率因数 λ 和基波功率因数 $\cos\varphi_1$ 来表示。

总功率因数 λ 为输入有功功率(包括谐波电流产生的有功功率) P_{ac} 与输入视在功率 S 之比,即

$$\lambda = P_{ac}/S \quad (1-6)$$

非正弦波输入电流的有效值 I 可以表示为

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2} \quad (1-7)$$

式中 $I_1, I_2, \cdots, I_n$ — 输入电流的基波分量和各次谐波分量(有效值)。

我们把各次谐波分量的有效值与基波分量的有效值之比称为总谐波畸变(Total Harmonic Distortion, THD):

$$THD = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_n^2)/I_1^2} \quad (1-8)$$

THD 用来衡量谐波对电网的污染程度。

如果基波电流滞后输入电压 U 的相位差为 φ_1 , 那么, 输入的交流有功功率 P_{ac} 为

$$P_{ac} = UI_1 \cos\varphi_1 \quad (1-9)$$

而视在功率 S 为

$$S = U \cdot I = U \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2} \quad (1-10)$$

则总功率因数 λ 为

$$\begin{aligned} \lambda &= \sqrt{\frac{I_1^2}{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2}} \cdot \cos\varphi_1 \\ &= \frac{I_1}{I} \cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD)^2}} \cos\varphi_1 \end{aligned} \quad (1-11)$$

从式(1-11)可以看出, 总功率因数 λ 为畸变因数(Distortion Factor) I_1/I 与位移因数(Displacement Factor) $\cos\varphi_1$ 的乘积。

在某些书籍中, 总功率因数也称为功率因数 f_p , 畸变因数 I_1/I 也称为基波因数, 位移因数 $\cos\varphi_1$ 也称为基波功率因数。

1.2.5 直流电压调整值和直流电压调整率 d

整流器的直流电压调整值为设定空载输出直流电压 U_{d0} 与负载直流电流 I_d 下的输出直流电压 U_d 之差, 即

$$\text{直流电压调整值} = U_{d0} - U_d$$

整流器的直流电压调整率为直流电压调整值与理想空载输出直流电压 U_{d0} 的百分比值, 即

$$d = \frac{U_{d0} - U_d}{U_{d0}} \times 100\% \quad (1-12)$$

整流器的直流电压调整值有固有直流电压调整值 U_{dP} 和总直流电压调整值 U_{dZ} 之分。 U_{dP} 表示整流器自身的直流电压调整值, 而 U_{dZ} 除包括 U_{dP} 以外, 还包括市电网阻抗引起的直流电压调整值 U_{dL} , 即

$$U_{dZ} = U_{dP} + U_{dL} \quad (1-13)$$

整流器的直流电压调整率 d 有固有直流电压调整率 d_P 和总直流电压调整率 d_Z 之分。 d_P 表示整流器自身的直流电压调整率, 而 d_Z 除包括 d_P 以外, 还包括市电网阻抗引起的直流电

压调整率 d_L , 即

$$d_z = d_p + d_L \quad (1-14)$$

固有直流电压调整值 U_{dP} 和固有直流电压调整率 d_p 可按下面的表达式计算:

$$\begin{aligned} U_{dP} &= U_{d0} - U_d \\ &= (U_{dxt} + U_{drt}) + (U_{dxb} + U_{drb}) + U_{da} \end{aligned} \quad (1-15)$$

式中 U_{dxt} ——变压器漏感引起的固有直流电压调整值;

U_{drt} ——变压器电阻引起的固有直流电压调整值;

U_{dxb} ——电抗器感抗引起的固有直流电压调整值, 包括市电电网一侧感抗引起的固有直流电压调整值 U_{dxbL} 和整流器件一侧感抗引起的固有直流电压调整值 U_{dxbv} ;

U_{drb} ——电抗器电阻引起的固有直流电压调整值, 包括市电电网一侧电阻引起的固有直流电压调整值 U_{drbL} 和整流器件一侧电阻引起的固有直流电压调整值 U_{drbv} ;

U_{da} ——整流器件引起的固有直流电压调整值, $U_{da} = U_F - U_{T0}$ 。 U_F 为整流器件的正向电压降, U_{T0} 为整流器件的门槛电压。

$$d_p = (d_{xt} + d_{rt}) + (d_{xb} + d_{rb}) + d_a \quad (1-16)$$

式中 d_{xt} ——变压器漏感引起的固有直流电压调整率;

d_{rt} ——变压器电阻引起的固有直流电压调整率;

d_{xb} ——电抗器感抗引起的固有直流电压调整率, 包括市电电网一侧感抗引起的固有直流电压调整率 d_{xbL} 和整流器件一侧感抗引起的固有直流电压调整率 d_{xbv} ;

d_{rb} ——电抗器电阻引起的固有直流电压调整率, 包括市电电网一侧电阻引起的固有直流电压调整率 d_{rbL} 和整流器件一侧电阻引起的固有直流电压调整率 d_{rbv} ;

d_a ——整流器件引起的固有直流电压调整率, d_a 对应于 U_{da} 。

在市电电网的容量足够大或用户未提出要求时, 可以不考虑总直流电压调整值和总直流电压调整率, 只给出固有直流电压调整值 U_{dP} 和固有直流电压调整率 d_p 即可。

表 1-2 给出了整流器各种元器件引起的固有直流电压调整值和固有直流电压调整率, 利用表 1-2 和式(1-15)、式(1-16)可以求出整流器的固有直流电压调整值 U_{dP} 和固有直流电压调整率 d_p 。

表 1-2 整流器各种元器件引起的固有直流电压调整值和固有直流电压调整率

元器件的种类	连接方式	固有直流电压调整值	固有直流电压调整率(%)	说 明
变压器漏感	各种连接	$U_{dxt} = 0.01 K_X e_x U_d (I_d / I_{dN})$ $\approx 0.01 K_X e_1 U_d (I_d / I_{dN})$	$d_{xt} = 0.01 K_X e_x (I_d / I_{dN})$ $\approx 0.01 K_X e_1 (I_d / I_{dN})$	K_X ——变压器感抗电压降折算系数 e_1 ——变压器阻抗电压对额定电压的百分比
整流器件一侧 电抗器感抗	单相有中点的连接	$U_{dxbv} = q^2 I_d X_{bv} / (2\pi p)$	$d_{xbv} = 100 q^2 I_d X_{bv} / (2\pi p U_d)$	X_{bv} ——整流器件一侧的电抗器感抗 在三相整流器中为电抗器每相感抗
	单相桥式连接	$U_{dxbv} = 0.707 I_{bv} X_{bv} U_d / U_{bvN}$	$d_{xbv} = 70.7 I_{bv} X_{bv} / U_{bvN}$	q ——一个工频周期里换相次数 I_{bv} ——整流器件一侧电抗器电流
	三相有中点的连接	同单相有中点的连接	同单相有中点的连接	一般 $I_{bv} = I_{dN}$, I_{dN} 为额定直流电流
	三相桥式连接	$U_{dxbv} = 1.732 I_{bv} X_{bv} U_d \sin(\pi/p) / U_{bvN}$	$d_{xbv} = 1.732 I_{bv} X_{bv} \sin(\pi/p) / U_{bvN} \times 100\%$	U_{bvN} ——整流器件一侧绕组端子处的线电压 一般情况下取 $U_{bvN} = U_{v0}$, U_{v0} 为变压器副边的开路线电压

续表

元器件的种类	连接方式	固有直流电压调整值	固有直流电压调整率(%)	说 明
市电电网一侧电感器感抗	单相各种连接	$U_{dxbL} = 0.707 I_{bL} X_{bL} U_{dL} / U_{bLN}$	$d_{xbL} = 70.7 I_{bL} X_{bL} / U_{bLN}$	X_{bL} ——市电电网一侧电抗器每相的感抗 U_{bLN} ——网侧绕组端子处的线电压
	三相各种连接	$U_{dxbL} = 1.732 I_{bL} X_{bL} U_{dL} \sin(\pi/p) / U_{bLN}$	$d_{xbL} = 1.732 I_{bL} X_{bL} \sin(\pi/p) / U_{bLN} \times 100\%$	I_{bL} ——网侧电抗器电流 I_{bLN} ——市电电网一侧电抗器每相的额定电流 一般情况下取 $I_{bLN} = I_{LN}$ I_{LN} 为市电电网一侧的电流的额定值
整流器件	各种连接	$U_{dL} = s n_s (U_T - U_{T0})$	$d_L = s n_s (U_T - U_{T0}) \times 100 / U_{dL}$	s ——串联换相组数 n_s ——每个整流臂串联的器件数
整流电路中的电阻	各种连接	$\Sigma U_{dL} = \Sigma \Delta P / I_P$	$\Sigma d_L = \Sigma \Delta d \times 100 / (I_d U_{dL})$	$\Sigma \Delta P$ ——各种元器件的功耗的总和

1.3 整流器的谐波效应

在电力电子整流器中,特别是大功率PWM控制整流器中,由于应用了大功率开关器件,工作于开关状态,会对市电电网产生污染。即使是传统的半导体二极管整流器,在运行过程中也会在电网一侧的电流中含有大量谐波,使电网的电能质量下降。为了保证电网的电能质量,电网上各点电压不发生较大的畸变,不影响电网中其他用电设备的正常运行,必须对电力电子设备(包括电力电子整流器)产生的谐波加以限制。国际电工委员会提出标准对各类电力电子设备的谐波效应加以限制,我国参照国际电工委员会的标准也提出了相应的标准。

1. 在电网的容量足够大时,当整流器的容量(最大视在功率)不超过表 1-3 给出的限定值时,可以不计算电压、电流的谐波效应,而将整流器直接接入电网即可。

表 1-3 可直接接入电网的整流器的最大视在功率 S

电网电压 (kV)	可直接接入电网的整流器的最大视在功率 S (kVA)		
	$p=3$	$p=6$	$p=12$
0.38	8	12	—
6 或 10	85	130	250

当整流器的最大视在功率超过表 1-3 限定的数值时,必须对电压、电流的谐波效应进行计算,计算结果不能超过表 1-4 和表 1-5 限定的数值。

表 1-4 整流器允许注入电网的总谐波电压因数 THD_v 的极限值

整流器的供电电压 U (kV)	电网总电压畸变因数 THD _v 的极限值 (%)	各次电压谐波因数(%)	
		奇 次	偶 次
0.38	5	4	2
6 或 10	4	3	1.75
35 或 63	3	2	1
110	1.5	1	0.5

表 1-5 整流器注入电网的谐波电流的允许值 I_k

整流器的 供电电压 U (kV)	相应电网的 短路容量 S_k (MVA)	谐波次数和整流器注入电网的谐波电流的允许值 I_k (A)																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.38	10	53	30	27	61	13	43	9.5	8.1	7.6	21	6.0	18	5.4	5.1	7.1	5.7	4.2	3
6 或 10	100	14	10	7.2	12	4.8	8.2	3.6	3.2	4.3	7.9	2.4	6.7	2.1	2.9	2.7	2.5	1.6	1.5
35 或 63	260	5.4	3.6	2.7	4.8	2.1	2.1	1.6	1.2	1.1	2.9	1.1	2.5	1.5	0.7	0.7	1.3	0.6	0.6
≥ 110	750	4.9	3.9	3	4	2	2.8	1.2	1.1	1	2.7	1	3	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1

表 1-4 为国标中规定的整流器允许注入电网的总电压谐波因数(也称为电网总电压谐波畸变)THD_u的极限值。

表 1-5 为国标中规定的整流器注入电网的谐波电流的允许值 I_k

当电网的实际容量 S_c 与表 1-5 给出的电网短路容量 S_k 不同时,可利用式(1-17)来计算整流器实际允许注入电网的谐波电流值 I_n :

$$I_n = (S_c/S_k)I_k \tag{1-17}$$

举例说明式(1-17)的应用:整流器的供电电压 $U=380V$,电网的实际容量 $S_c=30MVA$,则整流器实际允许注入电网的 3 次谐波电流值 I_3 为

$$I_3 = (30/10) \times 30 = 90(A)$$

2. 当整流器注入电网的电压谐波因数或谐波电流超过表 1-4 或表 1-5 所规定的数值时,必须采取措施对谐波进行限制。可以考虑以下三方面来限制谐波。

1) 增加整流器输出的脉波数 p

从表 1-3 中可以看出,随着脉波数 p 的增大,允许整流器直接接入电网的最大视在功率 S 也随着增大。例如,整流器的供电电压 $U=380V$,最大视在功率 $S=10kVA$,若选取 $p=3$ 的电路结构,就不能将整流器直接接入电网,而必须对谐波效应进行计算,并采取抑制谐波的措施。若选取 $p=6$ 的电路结构,就可以将整流器直接接入电网,而不必对谐波效应进行计算。

但是,当 $p>12$ 时,电路结构比较复杂,成本增大,可靠性和可维修性相应降低,一般不建议采用 $p>12$ 的电路结构。

在 $p>36$ 时,由于此时对减小谐波效应已无明显效果,所以不宜采用 $p>36$ 的电路结构。

2) 增设滤波器

(1) EMI 滤波器

在整流系统中,可采用 EMI 滤波器,即可降低无用信号对整流系统的干扰,又可防止整流系统对电网的污染。EMI 滤波器的安装很重要,安装不正确,达不到抑制谐波的目的。正确的安装方法如图 1-2 所示。

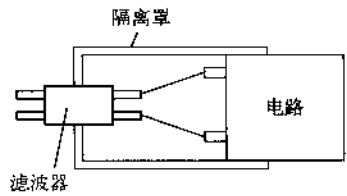


图 1-2 EMI 滤波器的安装方法