第 26 卷 第 23 期 中 国 电 机 工 程 学 报 Vol.26 No.23 Dec. 2006
2006 年 12 月 Proceedings of the CSEE ©2006 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号：0258-8013 (2006) 23-0163-04 中图分类号：TM461 文献标识码：A 学科分类号：470·40

一种带辅助电路的12脉波整流电路

陈 鹏，李晓帆，宫 力，熊招春

（华中科技大学电气学院，湖北省 武汉市 430074）

A 12-Puls Rectifier With an Auxiliary Circuit

CHEN Peng, LI Xiao-fan, GONG Li, XIONG Zhao-chun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: One of the problems of the most diode rectifiers is that they include large harmonic contents in its input current. A 12-pulse diode rectifier with an auxiliary voltage circuit is proposed. The purpose is to obtain a 12-pulse diode rectifier whose harmonic contents are reduced a lot. The auxiliary voltage circuit consists of two single-phase voltage converters which can be controlled conveniently. The auxiliary voltage reaches to the main circuit through transformer to improve the wave form of the input current. The reduction in the harmonic contents in the input currents is verified by a 6kW experimental results. Input current h_{THD} is only 3.8%for full load conditions.

KEY WORDS: 12-pulse rectifier; auxiliary circuit; input current; total harmonic distortion

摘要： 输入电流谐波含量高是多脉波二极管整流电路的一大缺点。该文提出了一种通过辅助电路回馈部分能量的 12 脉波整流电路，有效减小了输入电流谐波含量，提高功率因数。辅助电路由单相电压逆变器构成，产生交流辅助电压通过变压器耦合到主电路上，从而改善电流波形。此方法结构简单，易于对现有的传统 12 脉波整流电路进行改造。通过一台 6kW，输入相电压 150V 的实验设备，验证了该方法的可行性。满载时输入电流h_{THD}仅为 3.8%。

关键词： 12 脉波整流；辅助电路；输入电流；谐波总畸变率

0 引言

各种整流电路已经广泛运用到许多电力、电子等领域中[1-4]。采用高频 PWM 整流可以有效调节输出电压，使输入电流近似于正弦波。但其成本高，且开关损耗大，效率不高[5-6]。特别是在中、大功率场合，高频 PWM 整流的缺点就更加明显。采用多脉波二极管整流可以降低设备成本，提高效率，并且不会产生额外的 EMI，但其输入电流谐波含量较高。传统的 12 脉波整流方式可以在输入电流中消除 5、7 次谐波，且不会产生额外的 EMI[7-10]。但其输入电流的 THD(以下记为h_{THD})为 11.3%，谐波污染仍较大，不能满足绿色电源的要求。各种改善多脉波整流输入电流波形的方法已被提出[11-12]。本文提出一种带辅助电路的并联型 12 脉波整流电路，仅插入结构简单的辅助电路就可以大大减少输入电流谐波，特别是 11 次、13 次、23 次、25 次谐波，并使 2 个二极管整流桥均分负载电流。

1 带辅助电路的 12 脉波整流电路

1.1 电路结构

图 1 示出了带辅助电路的 12 脉波整流电路。它由两个三相二极管整流桥(Rec1 和 Rec2)并联而成。Y-Δ变压器产生 30°的相移。辅助电路为单相电压逆变器，输出电压经过变压器耦合到二极管整流桥的输出端。由于主电路中二极管整流桥输出电流方向始终为正，故单相逆变器只工作在 2 个象限，仅由两个全控器件和 2 个二极管组成。

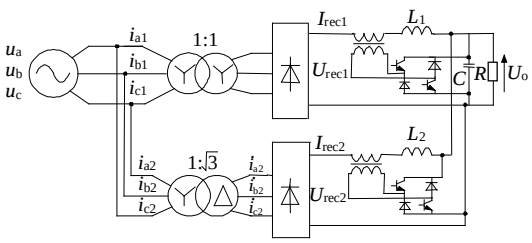


图 1 带辅助电路的 12 脉波整流电路
Fig. 1 The Proposed 12-pulse rectifier with auxiliary circuit

1.2 基本假设

如果 2 个二极管整流桥的输出电流 I_{rec1} 和 I_{rec2} 为波形相同相位相差 30°的三角波，那么 i'_{a1} 与 i_{a1} 波形相同相位相差 30°。i_{a1} 的波形如图 2 所示[13]。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

Y-Δ变压器原、副方绕组两侧的电流关系为[14]

$$\begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i'_{a2} - i'_{b2} \\ i'_{b2} - i'_{c2} \\ i'_{c2} - i'_{a2} \end{bmatrix} \tag{1}$$

根据式(1)的矢量关系式可以得出 i_{a2} 在半个周期内为三个波头的三角形，如图 2 所示。电路总的输入电流 $i_a = i_{a1} + i_{a2}$ 的 h_{THD} 仅为 1.06%。

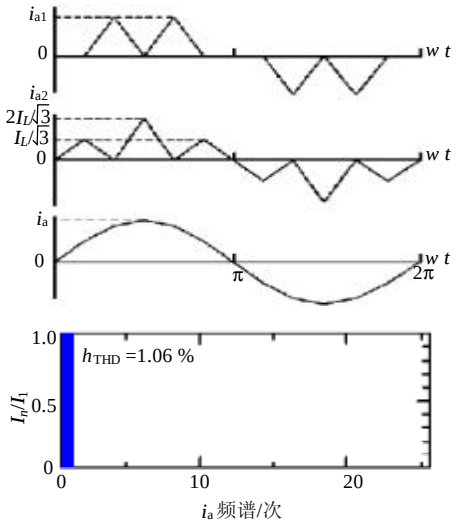


图 2 假设的电流波形

Fig. 2 Hypothetical current waveforms

I_L 为负载电流。从频谱图中看出，i_a 的 11、13、23、25 次谐波几乎完全消失。因此，如果采取某种方法，使二极管整流桥的输入电流如图 2 所示的波形，那么整流电路总输入电流谐波就会有效减小。

1.3 电路工作原理

假设输出电压 U_o 为常量，忽略各变压器漏感。

$$\begin{cases} u_a = U \sin wt \\ u_b = U \sin(wt - 2\pi/3) \\ u_c = U \sin(wt + 2\pi/3) \end{cases} \tag{2}$$

取 Rec1 回路分析，如图 3。

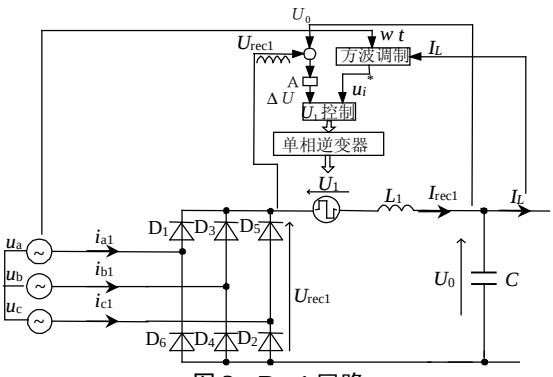


图 3 Rec1 回路

Fig. 3 Detailed circuit of Rec1

二极管整流桥输出电压 U_{rec1} 为每个周期内有 6 个波头的直流电压。其交流分量 $\Delta U = U_{rec1} - U_o$，如图 4 所示[15]。



图 4 DU 的波形

Fig. 4 Waveform of DU

从电路中取二极管整流桥输出电压 U_{rec1} 与输出电压 U_o 相减，经比例缩小得到调制信号 ΔU。u_i^* 为幅值随负载电流变化的方波调制信号。辅助电路的驱动信号是由 ΔU^* 和 u_i^* 相加作为调制波，与高频三角载波比较得到。辅助电路的输出电压为 $U_1 = u_i + \Delta U$。u_i 是幅值为 U_S，频率为 6 倍输入电源频率的方波[16]。

（1）0<wt<30°。

在此期间，电流流经 D_5 和 D_6，Rec1 回路的电压表达式为

$$L_1 \mathrm{d}I_{rec1}/\mathrm{d}t = u_c - u_b - U_o - U_1 = u_c - u_b - U_o - u_i - \Delta U = -U_S \tag{3}$$

在 U_S 的作用下，电流 $I_{rec1} = i_{c1}$ 呈线性减小，如图 5(b)所示。为了消除二极管之间的换相滞后，U_S 必须在 wt=30°时迫使 I_{rec1} 减小到零。由于 Rec1 和 Rec2 并联，为了达到均流的目的， Rec1 和 Rec2 分别承担负载电流的一半。在 0<wt<30°期间，I_{rec1} 从 I_L 线性下降到零，其平均值为 $I_L/2$，I_L 为输出负载电流。辅助电路产生的电压 U_S 与 I_L 的关系如下

$$U_S = 6wL_1I_L/\pi = 12fL_1I_L \tag{4}$$

（2）60°<wt<30°。

在 wt=30°时，电流从 D_5 换流到 D_1 中，因此电流 I_{rec1} 在此期间流经 D_1 和 D_6。

$$L_1 \mathrm{d}I_{rec1}/\mathrm{d}t = U_S \tag{5}$$

在 30°<wt<60°期间，电流 $I_{rec1} = i_{a1}$ 从 0 近似线性上升到 I_L。I_{rec1} 为三角形，其幅值与负载电流相关。在 wt=30°时，i_{a1} 从零开始线性上升，故 i_{a1} 和 u_a 之间没有时间延迟。

单相逆变器的直流输入为 U_0，变压器匝比为 20:1。根据式(4)，U_S 幅值是随着负载电流 I_L 而自动调节的，保证了负载电流变化时，I_{rec1} 仍为幅值为 I_L 的三角形。

在辅助电压 U_1 的作用下，二极管整流桥的输入电流波形成为接近如图 2 所示的三角形。i_{a1} 和 i_{a2} 叠加形成的总输入电流 i_a 近似于正弦波，并且功率因数十分接近 1。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

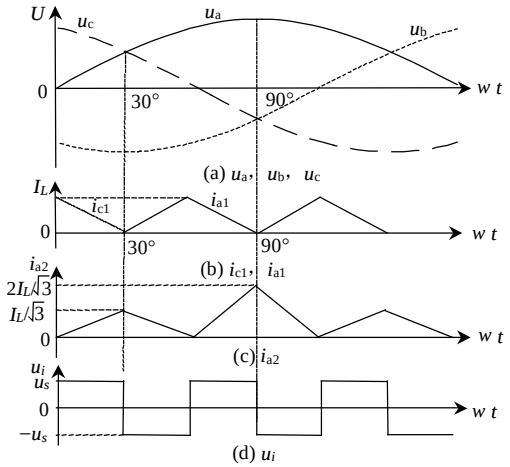


图 5 电流波形

Fig. 5　Current waveforms

2　实验结果

通过6kW的试验装置验证了图1中电路的有效性。电路参数为：输入相电压有效值 150V，频率 50Hz；$L_1 = L_2 = 1\text{mH}$；$C = 4700\mu\text{F}$；负载 $R = 20\Omega$。满载时输出电流 I_L =17.2A，U_o=344V。

图 6~8 为其试验波形图。图 6(a)中的电流 I_{rec1} 和 I_{rec2} 波形均为频率为 300Hz 的单极性三角波，相位相差 30°。需要注意的是，辅助电路的功率很小，仅为 205VA，为额定输出功率的 3.4%。在电源侧加

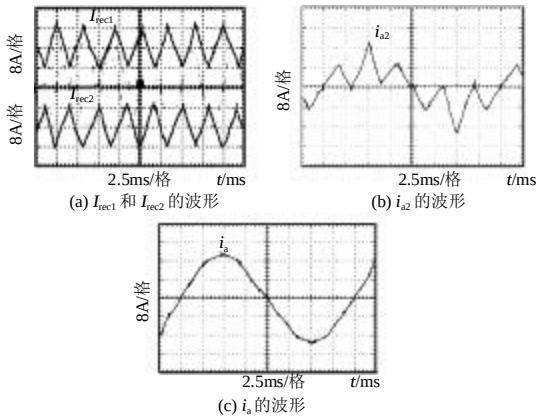


图 6 试验波形

Fig. 6　Experimental waveforms

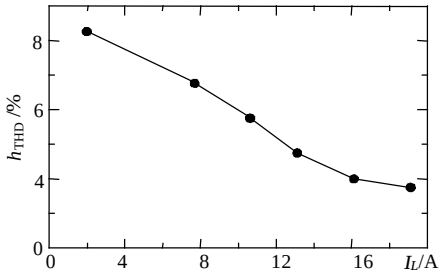


图 7　I_L 与 h_{THD} 关系图

Fig. 7　h_{THD} of rectifier input current as a function of I_L

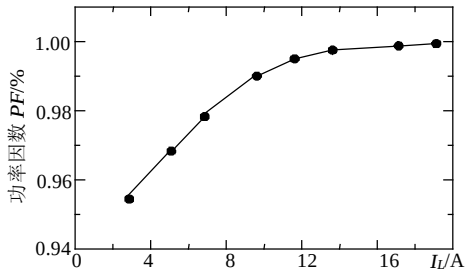


图 8　I_L 与功率因数关系图

Fig. 8 PF of rectifier input current as a function of I_L

入较小的 LC 滤波电路，滤除电流高频分量，可以得到较为理想的电流波形。图 6(c)中总输入电流 i_a 近似为正弦波，h_{THD} 仅为 3.8%，i_a 滞后 v_a0.1°。可以看出，本文提出的整流电路有效地减小了输入电流谐波含量 (传统 12 脉波整流 h_{THD} 为 11.3%)。

从图 7 可见，当负载电流越大，总输入电流 h_{THD} 越小。当负载电流大于额定电流的 70%时，h_{THD} 小于 5%。

图 8 表明随着 I_L 的增加，功率因数变大。当 I_L 达到额定负载电流 70%时，功率因数几乎等于 1。

3　结论

本文提出了一种带辅助电路的 12 脉波整流电路，通过辅助电路回馈部分能量，从而改善了电流波形。通过 6kW 的试验装置验证其输入电流 h_{THD} 仅为 3.8%，明显优于传统 12 脉波整流(h_{THD} 为 11.3%)。电路中整流桥每个二极管开关频率只有 50Hz，开关损耗较小。因此，电路十分适用于中、高功率场合。

参考文献

[1] 李冬，阮新波．一种复合型单开关功率因数校正预调节器[J]．中国电机工程学报，2003，23(8)：81-84．
Li Dong，Ruan Xinbo．A hybrid single-switch power factor correctionpre-regulator[J]．Proceedings of the CSEE，2003，23(8)：81-84(in Chinese)．

[2] 邓超平，刘晓东，凌志斌，等．三相单开关零电流Cuk 型功率因数校正器的研究[J]．中国电机工程学报，2004，24(4)：74-79．
Deng Chaoping，Liu Xiaodong，Ling Zhibin，et al．Study of a three-phase power factor correction based on a single zero-current switching Cuk converter[J]．Proceedings of the CSEE，2004，24(4)：74-79(in Chinese)．

[3] 张方华，王慧贞，严仰光．推挽正激整流及其应用 [J]．中国电机工程学报，2004，24(4)：168-173．
Zhang Fanghua，Wang Huizhen，Yan Yangguang．The push-pull forward rectifier and its application[J]．Proceedings of the CSEE，2004，24(4)：168-173(in Chinese)．

[4] 毛鸿，吴兆麟．基于三相PWM 整流器的无死区空间矢量调制策略[J]．中国电机工程学报，2001，21(11)：100-104．
Mao Hong，Wu Zhaolin．The non-dead-time space-vector-modulation

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

strategy based on three-phase PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE，2001，21(11)：100-104(in Chinese).

[5] 詹长江，康勇．滞后电流控制的 PWM 电压型高频整流电源研制[J]．电力电子技术，1996，(2)：29-32．
Zhan Changjiang，Kang Yong. Development of PWM high frequency voltage source ac-dc converter based on hysteresis current control [J]. Power electronics，1996，(2)：29-32(in Chinese).

[6] 贾正春，马志源．电力电子学[M]．北京：中国电力出版社，2002．

[7] 陈坚．电力电子学－电力电子变换和控制技术[M]．北京：高等教育出版社，2002

[8] 高格，傅鹏． 可控并联十二脉波四象限运行整流电源的研制[J]．电工技术学报，2004，19(7)：16-20．
Gao Ge，Fu Peng. Manufacture of parallel connection，12-Pulse rectifier with 4-quardant running mode[J]. Transactions of China electrotechnical society，2004，19(7)：16-20(in Chinese).

[9] Kim S，Enjeti P，Rendusara D．A new method to improve THD and reduce harmonics generated by a three-phase diode rectifier type utility interface[C]．IEEE IAS93 Conf．Proc．1993．1071-1077．

[10] Choi S，Enjeti P N，Pitel I J. Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capcities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface[J]．IEEE Power Electronics，1996，11(5)：680-690．

[11] Sewan Choi，Prasad N Enjeti，Hong-Hee Lee，et al．A new active interphase reactor for 12-pulse rectifier provides clean utility interface [J]. IEEE Trans. on Industry Applications，November/December 1996，32(6)：1304-1311．

[12] 潘启军，刘德志．变抽头六相整流电路的分析[J]．中国电机工程学报，2003，23(12)：146-152．
Pan Qijun，Liu Dezhi．Analysis of six-phase rectifier with tap-changer[J]．Proceedings of the CSEE，2003，23(12)：146-152(in Chinese).

[13] Jaehong Hahn，Enjeti P N．A wide input range active multi-pulse three-phase rectifier for utility interface of power electronic converters [C]．Industry Applications Conference，2002，37th IAS Annual Meeting，2000．

[14] Lee B，Hahn J，Enjeti P，et al．A robust three-phase active power-factor-correction and harmonic reduction scheme for high power[J]．IEEE Trans．on Industrial Electronics，1999，46(3)：483-494．

[15] Ertl H， Kolar J W. A constant output current three-phase diode bridge rectifier employing a novel “electronic smoothing inductor[C]．IEEE Trans．on Industrial Electronics，2005，52(2)：454-461．

[16] Shoji Fukuda，Masaaki Ohta．An auxiliary-supply-assisted twelve-pulse diode rectifier with reduced input current harmonics[C]．IEEE Industry Applications Conference，2004．39th IAS Annual Meeting，2004．

收稿日期：2006-06-14。

作者简介：

陈 鹏(1981—)，男，华中科技大学电力电子硕士研究生，主要从事 AC-DC 电路拓扑和 PFC 方面的研究，cpp522@tom.com。

（编辑 王彦骏）

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn