

基于谐波电流注入法的单相 整流电路谐波抑制

张海梁,孙婉胜

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:电力电子装置产生的谐波已成为电力系统的主要谐波污染源。介绍了基于无源滤波的谐波电流注入滤波法,其基本思想是在整流电路交流侧的方波电流中叠加某次谐波电流,对方波电流进行“整形”,可减少交流侧电流的谐波含量,降低畸变率。对单相整流电路的 2 次谐波电流注入滤波法进行了详细分析,通过 Matlab 数值计算仿真,取得了良好的滤波效果。

关键词:谐波抑制;谐波电流注入;整流电路;滤波法

中图分类号: TM 461

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0023-04

0 引言

随着电力电子装置应用的日益广泛,电网中的谐波污染日趋严重。谐波使电能生产、传输和利用的效率降低;谐波会引起电力系统局部并联谐振或串联谐振,使谐波含量放大,造成电容器等设备烧毁。谐波还会引起继电器保护和自动装置误动作。对于电力系统外部,谐波会对通信设备和电子设备产生严重干扰,而且电力电子装置所产生的谐波污染已成为阻碍电力电子技术自身发展的重大障碍。对电力系统这个环境而言,无谐波是绿色环境的主要标志之一^[1]。

本文对单相整流电路的谐波电流注入滤波法进行了研究,通过数值仿真,验证了 2 次谐波电流注入交流侧能够很好的起到谐波抑制的作用。

1 单相整流电路工作特性及谐波分析^[1~3]

单相整流电路中应用较多的是单相桥式全控整

流电路,由于谐波注入法理想的谐波源为电流型,所以这里只研究带阻感负载的工作情况。电路如图 1 所示,为了便于讨论,假定图示电路已经工作于稳态。

在 u_2 的正半周期, $\omega t = \alpha$ 处给晶闸管 V_{T1} 和 V_{T4} 加触发脉冲使其开通, $u_d = u_2$ 。负载中有电感存在使负载电流不能突变,电感对负载电流起平波的作用。假设负载电感很大,负载电流 I_d 连续且波形近似为一水平线,其波形如图 1 所示。 u_2 过零变负时,由于电感的作用使晶闸管 V_{T1} 和 V_{T4} 中仍然流过电流 I_d ,并不关断。至 $\omega t = \pi + \alpha$ 时刻,给 V_{T2} 和 V_{T3} 加触发脉冲,因 V_{T2} 和 V_{T3} 本已承受正电压,故两管导通, u_2 通过 V_{T2} 和 V_{T3} 分别向 V_{T1} 和 V_{T4} 施加反向电压而使两管关断,流过 V_{T1} 和 V_{T4} 的电流迅速转移到 V_{T2} 和 V_{T3} 上,此过程称为换相或者换流。至下一周期重复上述过程,如此循环下去, u_d 波形如图 1 所示,其平均值为

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = (2\sqrt{2}/\pi) U_2 \cos \alpha = 0.9 U_2 \cos \alpha$$

收稿日期: 2004-10-25; 修回日期: 2004-12-27

Research on dynamic voltage balancing of serial IGBTs

ZHA Shen-sen¹, ZHENG Jian-yong¹, SU Lin¹, WU Heng-rong², CHEN Jun²

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Huaxia Electrical Company, Yangzhong 212200, China)

Abstract: IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) operating in serial, which expand voltage capacity, brings the problem of voltage unbalancing. An experimental circuit with L and R as inductive loads is designed and simulated with PSpice. The reasons of dynamic voltage unbalancing of serial IGBTs are concluded: the differences in the absorption circuit parameters, the time-delays of gate driving signal and the gate driving circuit parameters. Some countermeasures are put forward: select the same type of IGBT, construct the absorption circuit with same structure and parameters, synchronize the gate driving signals, construct the gate circuit with same parameters, and so on.

This project is supported by Scientific and Technological Brainstorm Project of Jiangsu Province (BE2003043) and High Technology Project of Jiangsu Province (BG2004038).

Key words: IGBT; serial; dynamic voltage balancing; absorption circuit

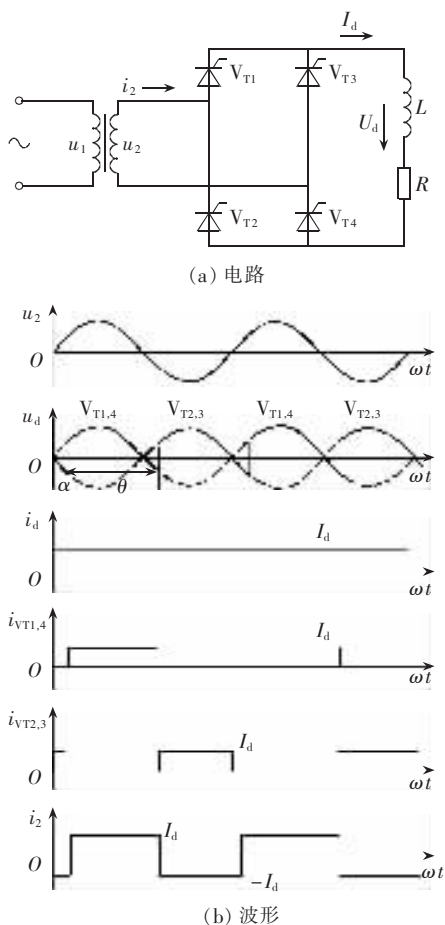


图1 单相整流电路带阻感负载时的电路图及波形

Fig.1 The single-phase rectification circuit with resistance and inductance, and the waves

当 $\alpha = 0$ 时, $U_d = 0.9U_2$; 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $U_d = 0$ 。 α 角的移相范围为 90° 。单相桥式全控整流电路带阻感负载时,晶闸管 V_{T1} , V_{T4} 两端的电压波形如图1的 u_d 波形中虚线所示,晶闸管承受的最大正反向电压均为 $\sqrt{2}U_2$ 。

晶闸管的导通角 θ 与触发角 α 无关,均为 180° , 其电流波形如图1所示,平均值和有效值分别为 $I_{dVT} = I_d / 2$, $I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 0.707 I_d$ 。

变压器二次电流 i_2 波形为正负各 180° 的矩形波,其相位由 α 角决定,有效值 $I_2 = I_d$ 。忽略换相过程和电流脉动,且直流电感 L 为足够大时,整流电路交流侧电流 i 波形近似为理想方波,如图1中 i_2 波形,将此电流波形进行傅里叶分解,可得:

$$I = \frac{4}{\pi} I_d \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \cdots \right) = \frac{4}{\pi} I_d \sum_{n=1,3,5,\cdots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n \omega t = \sum_{n=1,3,5,\cdots}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin n \omega t$$

其中基波和各次谐波有效值为

$$I_n = 2 \sqrt{2} I_d / (n \pi) \quad n = 1, 3, 5, \cdots$$

可见,交流侧电流中仅含有奇次谐波,各次谐波有效值与谐波次数成反比,对波形进行谐波分析可

知,该方波电流的谐波畸变率高达 47.91%, 其中最主要的谐波是 3 次谐波。

2 整流电路谐波抑制方法

谐波波形的畸变程度经常用谐波总畸变率 THD (Total Harmonic Distortion) 表示。电流谐波总畸变率 THD_i 定义为

$$THD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \% \quad (1)$$

式中 I_h 表示各次谐波电流总的有效值; I_1 表示基波电流有效值^[2]。

消除谐波,主要应从产生谐波的主要装置即电力电子装置出发,研究解决方法。消除谐波主要有两种途径:主动型,即从装置本身出发,设计不产生谐波的变流器;被动型,即外加滤波器,比如在电力系统中加 LC 滤波器,或在装置的电网侧加有源滤波装置等。

LC 滤波器是传统的无源谐波抑制装置,由滤波电容器、电抗器和电阻器适当组合而成,与谐波源并联,除起滤波作用外,还兼顾无功补偿的需要。这种滤波器出现最早,存在一些较难克服的缺点,但因其结构简单、投资少、运行可靠性较高以及运行费用较低,至今仍是谐波抑制的主要手段^[1,3]。

目前,谐波抑制的一个重要趋势是采用有源电力滤波器 APF (Active Power Filter)。它是一种电力电子装置,其基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流,由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流,从而使电网电流只含基波分量。APF 能对频率和幅值都变化的谐波进行跟踪补偿,且补偿特性不受电网阻抗的影响,而受到重视,获得广泛应用,但造价很高^[1]。

谐波注入滤波法基本思想是在三相整流电路交流侧的方波电流中叠加 3 次谐波电流,从而对方波电流波形进行“整形”,以此达到减少谐波含量、降低交流侧电流畸变率的目的^[4]。1972 年, A. Ametani 对 B. M. Bird 的谐波注入法理论进行了补充和概括,推广了此方法在各种整流电路中的应用^[5]。2000 年, P. Pejovic 提出了一种基于电力电子开关元件的谐波电流注入滤波法,为谐波注入滤波法开创了广阔的应用前景^[6]。

3 单相整流电路 2 次谐波注入滤波法

单相整流电路的输入电流是一个正负交替的方波如图 2(a) 所示,为了降低交流谐波畸变率,改善波形,可以向交流侧注入一个 2 次谐波电流,并且当方波由正变成负时,注入的 2 次谐波电流也反向注入,如图 2(b) 所示。

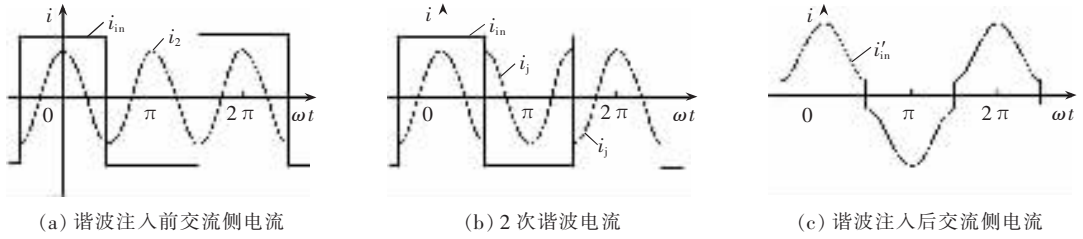


图2 2次谐波注入滤波法注入前后电流图

Fig.2 Waves before and after second-order harmonic injection

其中,图2(a)和(b)中的 i_{in} 为谐波电流注入前交流电源侧电流,其幅值大小等于负载电流 I_d ,图2(c)中的 i'_{in} 为谐波电流注入后交流电源侧的合成电流; i_2 为2次谐波电流, i_j 为实际注入交流侧的2次谐波电流。由图2(c)可知,注入后交流侧电流的谐波畸变率大大降低。

首先,定义谐波注入系数 ρ 为注入电流 i_j 的幅值 I_{jm} 与负载电流 I_d 之比^[7],即

$$\rho = I_{jm} / I_d \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (2)$$

这样,注入的2次谐波电流可以表示为

$$I_j = I_{jm} \cos 2\omega t = \rho I_d \cos 2\omega t \quad (3)$$

谐波注入后的交流电流侧合成波形在一个周期内(如 $-\pi/2 \leq \omega t \leq 3\pi/2$)的数学表达式为

$$I'_{in} = \begin{cases} I_d + I_j & -\pi/2 \leq \omega t \leq \pi/2 \\ -I_d - I_j & \pi/2 \leq \omega t \leq 3\pi/2 \end{cases}$$

根据式(3)得:

$$I'_{in} = \begin{cases} I_d(1 + \rho \cos 2\omega t) & -\pi/2 \leq \omega t \leq \pi/2 \\ -I_d(1 + \rho \cos 2\omega t) & \pi/2 \leq \omega t \leq 3\pi/2 \end{cases} \quad (4)$$

根据 I'_{in} 的特性,将式(4)进行傅里叶分解,其傅里叶系数分别为^[2,3]

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\omega t d\omega t = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (I_d + \rho I_d \cos 2\omega t) \cos n\omega t d\omega t = \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} I_d \cos n\omega t d\omega t + \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \rho I_d \cos 2\omega t \cos n\omega t d\omega t = \\ &= \frac{4}{n\pi} I_d \sin n\omega t \Big|_0^{\pi/2} + \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \rho I_d [\cos(n+2)\omega t + \cos(n-2)\omega t] d\omega t = \\ &= \frac{4}{n\pi} I_d \sin \frac{n\pi}{2} + \frac{2}{(n+2)\pi} \rho I_d \sin \frac{(n+2)\pi}{2} + \\ &= \frac{2}{(n-2)\pi} \rho I_d \sin \frac{(n-2)\pi}{2} \\ b_n &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $n=1,3,5,7,\dots$ 。

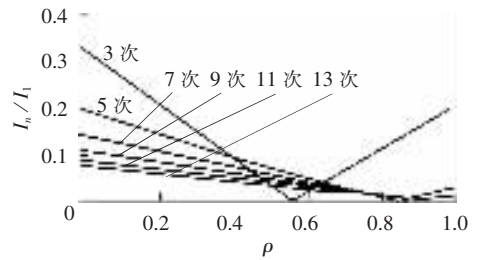
由于傅里叶系数 $b_n=0$,因此,根据式(5)可得谐波电流注入后,交流侧电流 I'_{in} 的傅里叶展开式为

$$I'_{in} = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} \cos[(2k+1)\omega t] \quad (6)$$

由式(5)(6)可得各次谐波电流的有效值与基波电流有效值的比值 I'_n / I_1 为

$$\begin{aligned} \frac{I'_n}{I_1} &= \frac{a_n}{a_1} = \\ &= \frac{\frac{4}{n\pi} I_d \sin \frac{n\pi}{2} + \frac{2}{(n+2)\pi} \rho I_d \sin \frac{(n+2)\pi}{2} + \frac{2}{(n-2)\pi} \rho I_d \sin \frac{(n-2)\pi}{2}}{\frac{4}{\pi} I_d} \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(7),可以得到各次谐波电流有效值与基波电流有效值的比值随谐波电流注入系数 ρ 值变化的曲线如图3所示,图中横坐标为谐波注入系数 ρ ,纵坐标表示随着 ρ 值从0~1变化,各次谐波电流有效值与基波电流有效值的比值大小变化情况。

图3 各次谐波与基波比值随 ρ 的变化曲线Fig.3 The variation curves of harmonic-to-fundamental ratio by ρ

由图3可知,通过适当调节 ρ 值的大小,可以使任意的电流谐波成份为零,即可以达到令某次谐波含量降为零。由此可知,适当选取 ρ 值的大小,可以使电流谐波总畸变率降到最小。

根据式(1)(6)(7),可得交流侧电流总谐波含量的表达式为

$$\text{THD}_i = \sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n'^2 \right) / I_1'^2} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{\infty} a_{2k+1}^2 \right) / a_1^2} \quad (8)$$

根据式(5)(8)画出谐波畸变率 THD_i 随 ρ 值变化的曲线^[7,8],如图4所示,当谐波注入系数 ρ 从0到1变化时,纵坐标谐波畸变率 THD 先减小再增大。

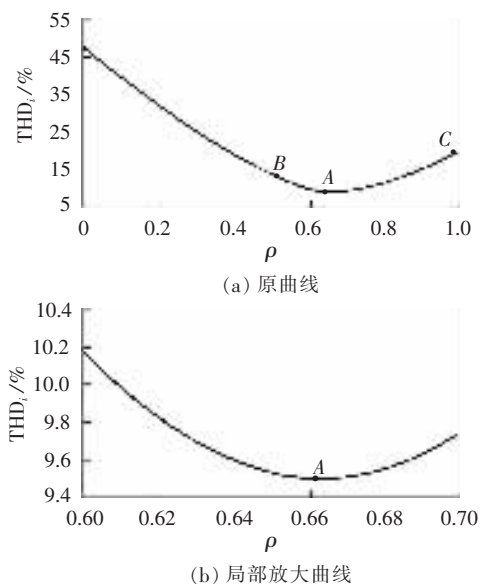


图4 THD 随注入系数 ρ 的变化曲线

Fig.4 The variation of THD by ρ

由图4可知,图中A点 THD_i 的最小值9.528%所对应的谐波注入系数 $\rho \approx 0.664$,称为最佳注入系数或最佳 ρ 值。以上分析结果表明,向交流电源侧注入与电源同步、幅值可控制的2次谐波电流,且为正反相交替注入交流电源侧,则在一定 ρ 值下,交流电源侧的合成电流波形的总电流谐波含量将会大大降低,起到了谐波抑制的作用。

4 结论

随着电力系统的不断发展以及电力电子元件的广泛应用,电力系统的谐波污染日益严重,对整流电路进行谐波污染治理是治理电力系统谐波污染的一个重要方面。本文在单相整流电路谐波分析的基础上,对单相整流电路的2次谐波电流注入滤波法进行了详细的分析,通过Matlab数值计算仿真,结果表明对单相整流电路交流侧进行2次谐波电流注入,能够抑制交流侧的谐波电流,起到了很好的谐波滤除效果,因此,有很高应用价值和广阔的应用前景,

尤其是应用于电气化铁路的线路改造当中。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 容健纲,张文亮. 电力系统谐波[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1994.
- [4] BIRD B M, MARSH J F. Harmonic reduction in multiplex converters by triple frequency current injection[J]. **IEEE PROC.**, 1969, 116(10): 1730 - 1734.
- [5] AMETANI A. Generalized method of harmonic reduction in AC - DC converters by harmonic current injection[J]. **IEEE PROC.**, 1972, 119(7): 857 - 864.
- [6] PEJOVIC P. Two three-phase high power factor rectifiers that apply the third harmonic current injection and passive resistance emulation[J]. **IEEE PROC.**, 2000, 15(6): 1228 - 1240.
- [7] 戴先中,徐以荣,何丹. 应用二次谐波注入抵消原理的无源单相低谐波整流装置[J]. 电工技术学报, 1998, 13(3): 23 - 26.
- DAI Xian-zhong, XU Yi-rong, HE Dan. Harmonic current counteracting method in a passive single-phase diode bridge rectifier by second harmonic current injection[J]. **Journal of Electrician Technique**, 1998, 13(3): 23 - 26.
- [8] DAI X, XU Y, HE D. Novel passive rectifier with low THD based on harmonic injecting and counteracting principle, electric power applications[J]. **IEE Proc.**, 1998, 145(4): 339 - 344.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

张海梁(1981-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: zhanghliang@tom.com);

孙婉胜(1982-),女,浙江金华人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制。

Harmonic suppression of single-phase rectifier based on harmonic current injection

ZHANG Hai-liang, SUN Wan-sheng

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The harmonics generated by power electronic equipment become the major harmonic sources in power systems. A harmonic injection based passive power filter is introduced, in which the square wave current at AC side of rectification circuit are superposed with a harmonic current and thus shaped to reduce the harmonic components of the current at AC side and lower the distortion rate. The second-order harmonic injection in single-phase rectification circuit is analyzed in detail and simulated with Matlab. Results show its good filtering effectiveness.

Key words: harmonic suppression; harmonic current injection; rectification circuit; filter method