

三相可控整流桥系统共模干扰研究

张 磊, 马伟明

(海军工程大学电力电子研究所, 湖北省 武汉市 430033)

RESEARCH ON COMMON-MODE EMI IN THE THREE-PHASE CONTROLLED RECTIFIER

ZHANG Lei, MA Wei-ming

(Naval Engineering University, Wuhan 430033, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The common-mode noise source of a three-phase controlled rectifier is modeled based on the principle of rectifier interference generating. Then the equivalent circuit is obtained from the measurement system which is set up according to the GJB152A-97. The common-mode interference current of a three-phase rectifier is calculated in frequency domain. The experiment results show the validity of the calculation.

KEY WORDS: Power electronics; Rectifier; Electromagnetic interference (EMI); Electromagnetic compatible (EMC)

摘要: 根据整流桥干扰产生的原理, 计算了三相整流桥的共模干扰源, 并结合按军标 GJB152A—97 建立的测试系统进行了分析, 得到了计算共模干扰电流的等效电路。利用频域法对一个三相可控整流桥产生的共模干扰电流进行了计算, 并与实验结果进行了比较, 实验结果证实了计算的有效性。

关键词: 电力电子; 整流桥; 电磁干扰 (EMI); 电磁兼容 (EMC)

1 引言

近年来, 各种电力电子装置的广泛应用使电网上出现了大量的电磁干扰源。它们产生的干扰可以通过公用的电源线或地线传导到其它设备上去。这些干扰超过一定的量值就会影响系统中其它设备的工作, 故要保证一个系统的正常运行, 就必须对这些干扰进行抑制。目前常采用试探—纠错法来解决电磁兼容问题。不仅需要大量的时间和经费, 同时很有可能引发新的电磁兼容问题。若在系统设计阶段就对干扰进行准确的分析, 就可以根据预测

的结果采取相应的措施, 这样就可以节省大量的时间经费并取得较好的效果。在电力电子系统中, 整流桥是最常用的设备, 对其进行研究后, 不仅其研究方法可以推广到其它的电力电子设备, 而且得到的结论也有实际的工程指导意义。目前, 国内外对整流桥产生的差模干扰已有了一些研究^[1-4], 对于其他变流器 (斩波、逆变等) 的共模干扰也有文献研究^[5-9], 但就整流桥而言, 由于其工作频率较低, 此时构成共模通道的寄生电容的阻抗较大, 故相对于其它种类的变流器, 整流器的共模干扰较小, 导致其研究较为困难, 也较少见到这方面的文献。然而随着供电系统集成化程度的提高, 在一些独立的供电系统中, 整流桥的共模干扰也会引起系统的电磁兼容问题, 故有必要对其进行研究。本文根据整流桥干扰产生的原理, 利用频域法计算了整流桥产生的共模干扰电流, 并与实验结果进行了比较。

2 研究对象与实验布置

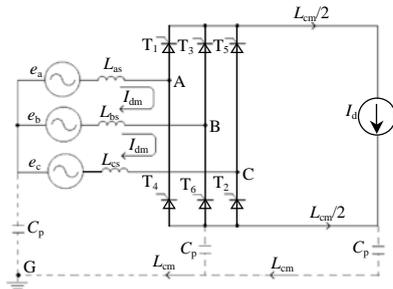
为简化分析, 首先假设电路是对称的, 即三相电源电压幅值相等, 相位互差 120° , 三相电源内阻抗相等, 直流侧电流连续。则研究对象如图 1 所示, 图中同时画出了电路中的共模与差模电流。图中三相电源可表示为

$$\begin{cases} e_a = E \cdot \sin(\omega t) \\ e_b = E \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ e_c = E \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

由于共模干扰受电路对地的寄生参数影响较大, 同时地线本身的阻抗也不是理想的^[10]。为了不失一般

基金项目: 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助 (教人司[2001]182 号)。

性，在研究中必须保持线路对地阻抗的稳定性，故按 GJB152A-97 的要求在电路中接入了阻抗稳定网络 (LISN)。在对称情况下，由于 $U_{AO}+U_{BO}+U_{CO}=0$ ，故可认为 0 点与 G 点相连不会影响系统的工作状态，即可选取 0 点为等效中点。以往的研究表明整流桥交流侧主要是差模干扰^[2-3]，而在整流桥直流侧才是共模干扰的主要来源。在测试时，将 LISN 插入整流桥直流侧测量，测试布置如图 2 所示。由于 LISN 具有阻抗稳定的特性^[11]，在以下的研究中认为线路的对地阻抗就是 LISN 的对地阻抗。



注: I_{cm} 与 I_{dm} 分别代表共模与差模电流; C_p 代表系统中的杂散电容

图 1 研究对象的等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of the research object

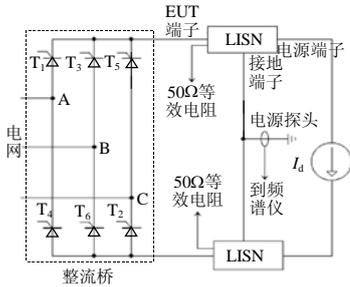


图 2 研究共模干扰时的测试布置

Fig.2 Layout of common-mode interference measurement

3 干扰分析

3.1 干扰源分析

根据第 2 节的分析，在三相对称的情况下，交流侧的等效共模电压为： $(U_{AO}+U_{BO}+U_{CO})/3=0$ ，即此时共模电压应由干扰的直流侧产生，则共模干扰的等效电路如图 3(a)所示，图中共模电流为

$$I_{cm} = \frac{U_+}{Z_0} + \frac{U_-}{Z_0} = \left(\frac{U_+ + U_-}{2} \right) / \left(\frac{Z_0}{2} \right) \quad (1)$$

即可认为图 3(b)中共模电压 $U_{cm} = \frac{U_+ + U_-}{2}$ ，共模阻

抗 $Z_{cm} = \frac{Z_0}{2}$ 。 Z_0 是指线路对地的阻抗，如 2 中所述，为简化起见，本文认为整流桥输出正负极对地阻抗对称，且仅受 LISN 影响，即 Z_0 是 LISN 的对地阻抗。

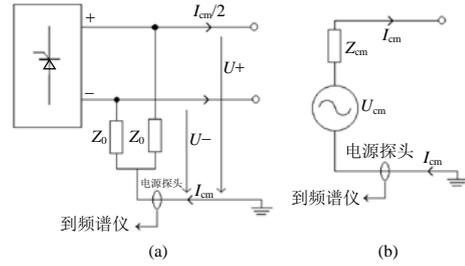


图 3 整流桥共模干扰等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of the rectifier CM interference

根据整流桥的不同时刻下的开关导通情况就可计算出不同时刻下的共模干扰电压。设三相整流桥的导通起始角为 α ，换相重叠角为 μ ，则从 $\alpha \sim \alpha + \pi$ 的时间内，共模电压 U_{cm} 的表示式如表 1 所示，表中 ω 为电源角频率， E 为三相电源相电压幅值。

表 1 共模电压 U_{cm} 的表示式
Tab.1 Expression of CM voltage U_{cm}

时刻	U_+	U_-	$U_{cm} = \frac{U_+ + U_-}{2}$
$\alpha \sim \alpha + \mu$	$\frac{u_a + u_c}{2}$	u_b	$\frac{1}{4} \cdot E \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi)$
$\alpha + \mu \sim \alpha + \frac{\pi}{3}$	u_a	u_b	$-\frac{1}{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi)$
$\alpha + \frac{\pi}{3} \sim \alpha + \frac{\pi}{3} + \mu$	u_a	$\frac{u_b + u_c}{2}$	$\frac{1}{4} \cdot E \cdot \sin(\omega t)$
$\alpha + \frac{\pi}{3} + \mu \sim \alpha + \frac{2\pi}{3}$	u_a	u_c	$-\frac{1}{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi)$
$\alpha + \frac{2\pi}{3} \sim \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu$	$\frac{u_a + u_b}{2}$	u_c	$\frac{1}{4} \cdot E \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3} \cdot \pi)$
$\alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu \sim \alpha + \pi$	u_a	u_c	$-\frac{1}{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t)$

从表中可以看出

$$U_{cm}(\omega t + \frac{\pi}{3}) = -U_{cm}(\omega t) \quad (2)$$

$$U_{cm}(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = U_{cm}(\omega t) \quad (3)$$

3.2 干扰计算

在低频情况下，系统中的干扰主要是电源频率的各次谐波，可以通过谐波分析计算，但在高频情况下，需要计算的是在一个频段内干扰的影响，即干扰包络。在电力电子系统中，主要是由开关器件的通断引起的电磁干扰，故需要计算开关通断时产生的干扰。尽管开关通断需要一定的时间，但对于干扰预测来说，在计算频谱包络时，可以忽略开关通断的时间^[12]，即可以认为开关通断过程是一个阶跃，则共模干扰可以如下计算。若记

$$f_1(\theta) = \frac{1}{4} \cdot E \cdot \sin(\theta - \frac{2}{3} \pi) \quad (4)$$

$$f_2(\theta) = -\frac{1}{2} \cdot E \cdot \sin(\theta - \frac{4}{3} \pi) \quad (5)$$

则在 α 到 $\alpha + \frac{2}{3}\pi$ 的周期内, 整流桥共模电压经历 4 次跳变, 每次跳变的值为:
在 α 时刻

$$\Delta U_1 = f_1(\alpha) - f_2(\alpha - \frac{2\pi}{3}) = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \sin(\alpha - \frac{\pi}{6}) \quad (6)$$

在 $\alpha + \mu$ 时刻

$$\Delta U_2 = f_2(\alpha + \mu) - f_1(\alpha + \mu) = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \sin(\alpha + \mu - \frac{\pi}{6}) \quad (7)$$

在 $\alpha + \frac{2}{3}\pi$ 时刻

$$\Delta U_3 = -f_1(\alpha) + f_2(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \quad (8)$$

在 $\alpha + \frac{\pi}{3} + \mu$ 时刻

$$\Delta U_4 = f_1(\alpha + \mu) - f_2(\alpha + \mu) \quad (9)$$

由于时域上的延迟 t 对应应在 s 域上乘以 $e^{-s \cdot t}$, 则在 α 到 $\alpha + \frac{2}{3}\pi$ 一个周期内, 在 s 域上三相整流桥的共模干扰电压可以如下计算

$$U_{cm}(s) = \frac{1}{s} \cdot (\Delta U_1 + \Delta U_2 \cdot e^{-s \cdot t}) \cdot (1 - e^{-s \cdot \frac{\pi}{3\omega}}) \quad (10)$$

以 $j\omega$ 代替式(10)中的 s 并乘以 $6f$ 即可得到整流桥在频域上的共模干扰表示式, 即

$$U(j\omega) = 6f \cdot U_{cm}(s) \Big|_{s=j\omega} \quad (11)$$

式中 f 为电源频率, $n=1, 2, 3 \dots$

从式(10)、(11)可以看出 U_{cm} 中仅含有 3 的倍数次谐波, 并且不存在偶次项, 即在理想情况下, 三相整流桥系统中的共模干扰仅包含 3 的奇数次 (3、9、15……) 谐波。

将式(11)代入(1)式即可计算出三相整流桥在直流侧产生的共模电流。

为了与测试结果比较, 将一个测量带宽内的干扰迭加后就可以得到三相整流桥产生的共模干扰。

$$S_{cm} = \sum_{f_i - Bw/2}^{f_i + Bw/2} |I_{cm}(j \cdot \omega)| \quad (12)$$

4 实验验证

为了验证上述分析的正确性, 在实验室里按照图 2 布置对一个三相可控整流器的共模干扰进行了测量和计算。实验系统的参数为: 电源线电压: $U_{LL}=210V$, 频率 $f=50Hz$, 电源线路电感为 $6\mu H$, 输出电压电流为 $U_d=248V$, $I_d=4A$ 。用频谱仪 (HP3588A) 对地线上的共模电流频谱进行了测

量。在测试中发现在 $1MHz$ 以上整流桥的共模干扰已低于了频谱仪的噪声电平, 故在此只研究了 $10kHz \sim 1MHz$ 的频谱。测量环境的共模干扰电流如图 4 所示, 整流桥工作时的共模干扰电流如图 5 所示, 计算结果也画在同一张图上, 测量带宽为 $1200Hz$, 可以看出计算是比较准确的。(对比图 4、图 5 可知图 5 中 $800kHz$ 附近的尖峰是外界的环境干扰)。

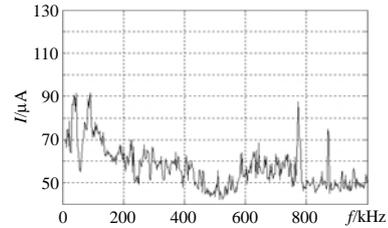


图 4 测试环境中的共模干扰电流
Fig.4 CM current in measurement environment

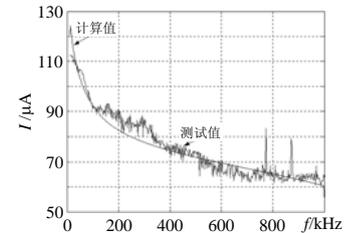


图 5 $U_d=248V$, $I_d=4A$ 时测试结果与计算结果
Fig.5 Experiment results and calculated results
 $U_d=248V$, $I_d=4A$

图 6 画出了 LISN 在系统中不同位置处测得的共模干扰电流及环境干扰。可以看到, 当 LISN 位于交流侧时, 其共模干扰电流基本上就是环境干扰电流, 这说明本文 2 中分析是正确的, 即整流桥直流侧才是共模干扰的主要来源。

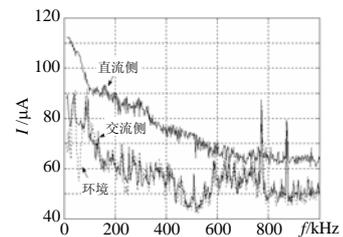


图 6 整流桥不同位置处共模干扰电流对比
Fig.6 Comparison of CM current in different part of rectifier

5 结论

本文对三相整流桥产生的共模干扰进行了分析, 指出三相整流桥共模干扰主要来源于直流侧, 并结合测试系统得到了计算三相整流桥共模干扰的等效电路。利用频域法对三相整流桥的共模干扰进行了计算, 其方法和结论对于实际工程应用都具

有指导意义。

参考文献

- [1] Scheich R, James Roudet. EMI conducted emission in the differential mode emanating from an SCR: phenomena and noise level prediction[J]. IEEE Tran. on Power Electronics, 1995, 10(2): 105-110.
- [2] 马伟明. 《电力电子系统中的电磁兼容》[M]. 武汉: 水利电力大学出版社, 2000.
- [3] 张磊, 马伟明. 三相整流桥的差模射频传导 EMI 预测[J]. 电力电子技术, 2003, 37(1): 58-60.
Zhang Lei, Ma Weiming. The prediction of three-phase rectifier DC side common-mode EMI[J]. Power Electronics, 2003, 37(1): 58-60.
- [4] 孟进, 马伟明, 刘德志, 等. 交流发电机整流系统传导电磁干扰的时域模型与仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 75-79.
Meng Jin, Ma Weiming, Liu Dezhi *et al.* Time domain model and simulation analysis of the conducted EMI for alternator-rectifier systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 75-79.
- [5] 单潮龙, 马伟明, 王铁军, 等. 挂接三相逆变器的直流电网共模传导干扰研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 134-139.
Shan Chaolong, Ma Weiming, Wang Tiejun *et al.* Research on common-mode conducted EMI of DC power supply with a three phase inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 134-139.
- [6] 和军平, 姜建国. 离线式 PWM 开关电源传导电磁干扰的分析和研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 91-95.
He Junping, Jiang Jianguo. Research on conducted EMI of an off-line PWM switched mode power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 91-95.
- [7] 陈斌, 姜建国, 孙旭东. PWM 逆变器—感应电机驱动系统中接地电流 EMI 问题的分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 58-62.
Chen Bin, Jiang Jianguo, Sun Xudong. Analysis of EMI due to grounding current in a PWM inverter-induction motor drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 58-62.
- [8] 单潮龙, 马伟明, 王铁军. 灵敏度分析应用于软关断斩波器共模传导干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 167-171.
Shan Chaolong, Ma Weiming, Wang Tiejun. The application of sensitivity analysis on the study of common-mode conducted interference of a soft-switched DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 167-171.
- [9] 裴雪军, 张凯, 康勇, 等. PWM 逆变器共模干扰电流的衰减和抑制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 80-84.
Pei Xuejun, Zhang Kai, Kang Yong *et al.* Damping and suppression of common mode interference current in PWM inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 80-84.
- [10] 赵治华, 马伟明. 钢板地阻抗的频率特性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 119-124.
Zhao Zhihua, Ma Weiming. Frequency Characteristic of Ground Impedance for Steel Plane[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 119-124.
- [11] GJB152A-97《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》[S]. 国防科学技术委员会, 1997-5-23.
Department of defense test method standard for measurement of electromagnetic interference characteristics[S]. National Defence Technology Committee, 1997-5-23.
- [12] Li Ran, Sunil Gokam. Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems part II: frequency domain models[J]. IEEE Tran. on Power Electronics, 1998, 13(4): 768-776.

收稿日期: 2004-10-26.

作者简介

张磊 (1974-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向为电力电子系统中的电磁兼容;

马伟明 (1960-), 江苏人, 博士, 教授, 院士, 主要研究舰艇特种电源系统, 电力电子系统电磁兼容等。