

基于巨磁致电阻电流检测机理的电流驱动同步整流器

张 波¹, 丘东元¹, 黄志刚¹, 唐 志²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东广州 510640; 2. 艾默生网络能源有限公司, 广东深圳 518057)

摘 要: 本文将一种基于巨磁致电阻(Giant Magneto Resistive——GMR)的电流检测技术应用于同步整流技术中. 该技术可以克服传统电流驱动同步整流器中电流检测器件损耗较大、不能测直流、漏感大、不能工作于高频等缺点. 本文内容包括 GMR 电流检测技术原理和性能分析, GMR 电流检测电流驱动同步整流正激变换器的实验研究. 研究结果表明, 该变换器工作性能理想, 在轻载情况下效率有较大幅度的提高, 说明 GMR 是一种可以实际应用的电流检测技术.

关键词: 巨磁致电阻; 同步整流; 电流驱动; 空载效率; 电流检测

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 08-1462-05

Current-Driven Synchronous Rectifier Based on GMR Current Sensing Technology

ZHANG Bo¹, QIU Dong-yuan¹, HUANG Zhi-gang¹, TANG Zhi²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

2. Emerson Network Power Co., Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: This paper applied Giant Magneto Resistive (GMR) current sensing method in a current-driven synchronous rectifier. Comparing with the conventional current sensors, GMR current sensor can overcome the drawbacks of large loss, no DC capability, large leakage inductance and low switching frequency. The current sensing theory of GMR current sensor was discussed and a current-driven synchronous Forward converter with GMR current sensor was provided. The experimental results show that the performance of the modified Forward converter is good and its efficiency at light load is improved.

Key words: giant magneto resistive (GMR); synchronous rectifier; current-driven; no-load efficiency; current sensing

1 引言

随着计算机、网络和通讯技术的迅猛发展, 为了提高数字电路计算和数据处理速度, 减小电能损耗, 需要设法降低数字电路的参考电平^[1,2]. 采用同步整流技术的低压大电流功率变换器成为高频开关电源的一个研究热点, 而如何减小整流损耗、提高整流效率则成为核心问题. 目前应用最广泛的电压自驱动型同步整流技术具有结构简单、经济高效的优点, 但同时存在着三个方面的局限性^[3,4]: (1) 不同的开关电源拓扑结构需要不同的电压驱动同步整流管; (2) 同步整流管的栅极驱动电压随输入电压的变化而变化; (3) 采用电压驱动同步整流器的变换器不适合并联运行^[5,6]. 因此, 电流型驱动技术是解决上述问题的有效方法.

传统的电流驱动同步整流器结构模块和原理电路如图 1 所示^[7~9]. 当同步整流管 SR 导通且电流从源极流向漏极时, 检测电流 I_{sr} , 当电流降低为 0 或反向时,

同步整流管关断. 电流驱动同步整流管就象一个普通二极管, 能够自动的开通和关断.

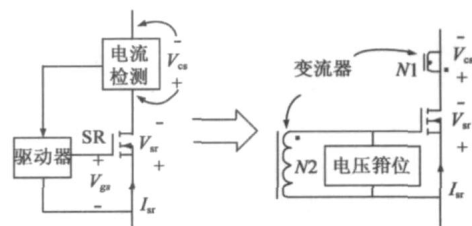


图 1 同步整流管的电流驱动电路

对于图 1 所示的传统电流驱动方式, 电流检测电路实际上存在损耗, 为了减小该损耗, 电流检测器件的电压降必须尽可能小. 如果同步整流管的导通压降 0.1V (典型值), 那么电流检测器件的电压降应该远远小于 0.1V (比如 0.01V, 为同步整流管导通压降的十分之一). 由此带来以下问题: (1) 若采用电阻为电流检测器件, 为将该极小的电压信号放大到最小驱动电压 (5V), 必须采用一个高增益带宽的电压放大器; (2) 若采用电

流互感器 CT, 互感器的变比非常之高(对于上述假设, 变比达到 500:1), 而绕制变比如此之大的互感器一般非常困难, 电气特性势必很差。其次, 低电流比和大的漏感在开关动作时驱动延时明显, 恶化了同步整流器的工作性能。此外, 电流互感器 (CT) 还存在不能测量直流和有饱和危险等因素, 从而使得传统的电流驱动同步整流器不适合高频工作和实际应用。

为此, 本文基于现代材料技术的发展, 将巨磁致电阻 (GMR-Giant Magneto Resistive) 电流检测技术应用于电流驱动同步整流技术中。文中介绍了该技术的电流检测原理, 设计出基于 GMR 电流检测的电流驱动电路, 实验结果验证了该方法的可行性。

2 GMR 电流无损检测原理

2.1 GMR 特性

上世纪七十年代, 科学家们发现了一种材料的磁致电阻效应, 称为 AMR (Anisotropic Magneto Resistance), 在外磁场改变时, 磁性材料的电阻会发生改变, 因此得到广泛应用^[10]。1988 年, 科学家们在纳米级磁性多层膜中发现了巨磁致电阻 (GMR-Giant Magneto Resistive) 效应^[11]。其特点是当外界没有磁场时, GMR 材料呈现很大的电阻。但当外界有磁场时, GMR 材料的电阻比无外加磁场时减少, 所产生的磁阻效应比一般的磁电阻效应大一个数量级以上(这也是“巨磁致电阻”名字的由来), 且具有灵敏度高、热稳定性好、体积小、输出线性度好、可靠性高等特点。目前, 巨磁致电阻材料已经成功应用于计算机硬盘、随机存储器以及磁场、角度、角速度、位移等物理量的测量, 具有重大应用价值。

巨磁阻效应是磁性多层膜中电子自旋相关散射造成的。不同自旋状态的载流电子与磁场的作用不相同, 因而导致电阻值的变化。根据磁电子学原理, 当电子穿过铁磁性层时, 如果电子自旋方向与铁磁性层的磁矩方向相同, 电子受到的自旋散射较弱, 磁性多层膜呈现低阻态; 如果电子自旋方向与铁磁性层的磁矩方向相反时, 电子受到的自旋散射较强, 磁性多层膜呈现高阻态。这种效应只有在纳米尺度的薄膜结构中才能观测出来。图 2 为巨磁致电阻的结构, 它由多层铁磁性层与非铁磁性层交替叠置而成, 每层厚度为纳米级别。其中 A 层是非磁性导体材料, B 层为磁性材料, C 表示电流方向, D 则为外加磁场的方向。

在不加外磁场的情况下且非磁层厚度合适时, 两个相邻的铁磁层会产生反铁磁耦合, 即相邻层的磁矩反平行排列, 如图 2(a) 所示。那么在一个铁磁层中受到较弱散射的电子进入另一铁磁层后必定遭受较强的散射, 故从整体而言, 所有电子都遭受较强的散射, 使巨磁致电阻处于高阻态。设 R_X 是自旋方向电子在受到相

同方向磁矩散射时的电阻总和, R_Y 是受到反方向磁矩散射时的电阻总和, 且 $R_X < R_Y$ 。此时巨磁致电阻可看作由两类不同自旋方向的电子产生的阻抗并联而成,

$$\text{其总阻抗为} \quad R_0 = \frac{R_X + R_Y}{2} \quad (1)$$

当加入外磁场后, 与外磁场反向的磁矩将趋向外磁场方向。如果外加磁场达到一定值, 所有铁磁层中的磁矩方向会变得基本一致, 相邻磁性层磁矩平行分布如图 2(b) 所示。此时自旋方向与磁矩方向相同的电子在所有铁磁层中受到的散射较弱, 电阻很小(为 R_X), 相当于短路状态。而自旋方向与磁矩方向不同的电子则受到很强的散射, 电阻很大(R_Y), 此时巨磁致电阻的总

$$\text{阻抗表示为} \quad R_H = \frac{R_X R_Y}{R_X + R_Y} \quad (2)$$

对比式(1)和式(2)可见, 有外加磁场时的总阻抗比无外加磁场时的要小得多, 即 $R_H < R_0$, 故巨磁致电阻在外加磁场作用下呈现出低阻态的导电特性^[12]。

2.2 GMR 检测电流方法

由电工学原理知, 当电流流过无限长导线时, 在导线的周围产生磁场, 并且在导线周围某点的磁场强度大小与该点和导线的垂直距离成反比、与导线中流过的电流大小成正比。依照 GMR 的特性制成的电流检测芯片是一种直接测量磁场强度的元件, 为隔离型测量器件, 它测量的是磁场强度而非磁场的变化速率, 故可测量直流。

由于外磁场改变了磁性层的磁矩方向, 因此 GMR 电流检测芯片的放置将影响磁性层的电阻大小, 进而对输出电压产生直接影响。为了获得最大的输出, 磁矩方向应该和电流的方向垂直。在实际应用中通常将 GMR 电流检测芯片紧贴并横跨导电铜箔表面, 以测量由电流产生的磁场。

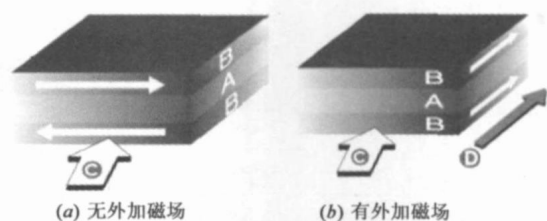


图 2 GMR 材料的特性示意图

GMR 电流检测芯片内部由四个巨磁致电阻构成惠斯登电桥结构, 如图 3 所示, 该结构可以减少外界环境对传感器输出稳定性的影响, 增加传感器灵敏度。当芯片下面的导线流过电流时, 电流所产生的磁场使

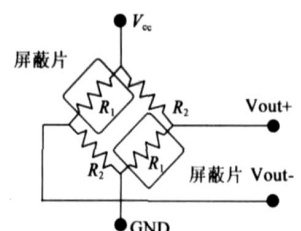


图 3 GMR 电流检测芯片的结构原理图

R_2 的阻值下降, 由于 R_1 被屏蔽, 故其阻值不变, 从而在电桥两端产生电压差, 形成输出信号. 输出端的电压差为:

$$V_{out+} - V_{out-} = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} \quad (3)$$

因此芯片输出电压的大小可以反映被测电流的大小.

2.3 几种电流传感器的比较

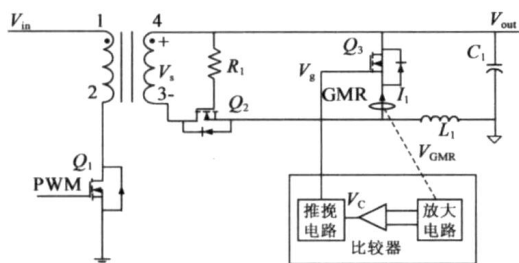
几种由不同材料制作而成的非接触式电流传感器的性能对比如表 1 所示, GMR 电流检测芯片克服了传统电流驱动同步整流器中电流检测器件损耗较大、不能测直流、漏感大、不能工作于高频等缺点, 将有广阔的应用前景^[13,14].

表 1 几种电流传感器的性能对比

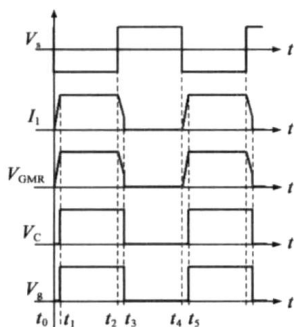
名称	CT	Hall	GMR
价格	中	高	中
体积	大	中	小
灵敏度	低	中	高
测量范围	0.1Hz ~ 100MHz	DC ~ 1MHz	DC ~ 5MHz
线性度	好	差	好
集成度	一般	一般	好

3 基于 GMR 的电流驱动同步整流技术

图 4 为采用了 GMR 电流检测技术的电流驱动同步整流器. 图中, GMR 芯片检测续流管支路电流, 检测信号经放大后通过比较器产生 PWM 方波, 再经推挽放大电路以驱动功率 MOSFET, 实现控制功能.



(a) 电路原理图



(b) 典型工作波形

图 4 采用 GMR 电流检测的电流驱动同步整流电路及其典型波形
电路的典型工作波形如图 4(b) 所示, 该电路工作

过程如下: t_0 时刻, 主开关管 Q_1 关断, 变压器副边电压 V_s 为负, 电路进入续流阶段, Q_2 被关断. 此时电流开始流过 Q_3 的体二极管, 电流 I_1 从零迅速上升, 此时 GMR 检测到电流, 输出电压增大至开通值使比较器输出高电平, 推挽电路放大比较器的输出电流, 驱动 Q_3 开通, 直至 t_1 时刻, 电流上升到稳定值. 此过程时间极短, 电流流过体二极管的时间很有限, 不会引起效率的下降. t_2 时刻, 主开关管 Q_1 导通, 变压器副边电压 V_s 为正, 此时 Q_2 被导通, 而 Q_3 也仍然导通, 出现了一个很短暂的直通过程. 在此过程中, Q_3 会流过与 I_1 反方向的电流, 此电流值很大, 可以在很短的时间内把 I_1 抵消到 0. 在 I_1 降为 0 的过程中, t_3 时刻, GMR 检测到电流的减小, 输出亦变小, 当输出值减小到关断值时, 比较器输出低电平, Q_3 的寄生电容通过推挽驱动电路放电, 续流管被关断. 上述工作过程完成了从续流阶段过渡到整流阶段. t_3 时刻, 续流管关断后, I_1 减小到 0, Q_2 开通, 变换器工作在整流阶段. 直至 t_4 时刻变压器副边电压重新变负, 开始另一个新的周期.

4 实验验证

4.1 GMR 芯片稳定特性验证

实验中采用深圳华夏公司的 SS501A 型 GMR 芯片, 导线中通过电流在测量芯片处产生的磁场强度(单位为 Oe)为

$$T = \frac{2I}{D_0 + 1.153} \quad (4)$$

式中 D_0 为导线铜箔表面到芯片距离, 单位为 mm; I 为所测量电流的大小, 单位为 A.

那么芯片输出电压信号大小为

$$V_{GMR} = k \times V_{CC} \times T \quad (5)$$

其中 V_{CC} 为芯片的电源电压(单位为 V), 校正系数 k 取 0.0036.

图 5 为所用的 GMR 芯片测量直流电流时所得的实验数据(实验中 $V_{CC} = 5V$, $D_0 = 0.15mm$). 从图中可见, 芯片实际输出电压与计算值基本吻合, 且线性度良好.

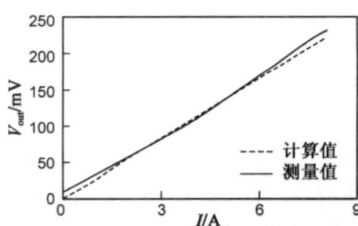


图 5 GMR 电流检测芯片的测量结果

4.2 GMR 芯片动态响应验证

开关电源一般工作在数百 kHz, 因而要求 GMR 电流检测芯片响应速度能够满足该频率要求.

GMR 电流检测芯片的动态响应测试电路及其波形如图 6 所示. 实验中的交流源是频率为 220kHz 的方波,

放大电路采用严格的几乎无延时的放大芯片以消除误差的引入.图 6(b)为测试结果,可见,该 GMR 电流检测芯片的输出动态响应特性良好,基本无延时,可以满足实际要求.

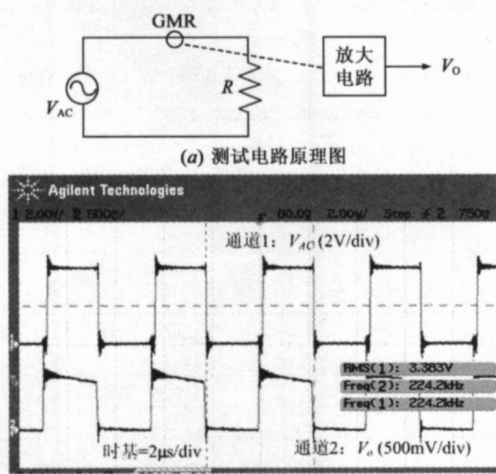


图 6 动态响应测试电路及波形

4.3 实验结果

本文选用艾默生网络能源公司的 BMP 电源模块 AVE100 - 24S03 进行测试,以验证 GMR 电流检测技术的优越性.该模块为一个正激变换器,采用电压自驱动技术,输入电压为 24V,输出电压为 3.3V,额定功率为 66W,工作频率为 260kHz.

将 GMR 电流检测技术应用于该模块时,先将模块副边续流管的原驱动去除,把 GMR 芯片贴于 MOSFET 漏极或者源极的铜线上以检测所流过的电流,实验电路参见图 4. GMR 芯片的输出经放大器 LT1364 放大后送至高速比较器 AD790 的输入端,恰当设定比较器的参考电压值,当电流上升到一设定值时比较器输出高电平,而当电流下降到另一设定值时输出低电平. MOSFET 驱动芯片采用 TC4424. 比较器的输出电压波形 V_C 和 MOSFET 的驱动电压波形 V_g 如图 7 所示.

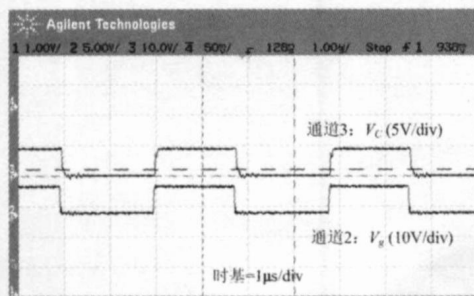


图 7 驱动波形图

由于采用电流型驱动,轻载时通过 MOSFET 电流很小,相应地,GMR 传感器输出很小,无法使比较器翻转输出高电平.因此在轻载阶段驱动电路不工作,减少了 MOSFET 的开关损耗,从而使模块的轻载效率得到大幅

度提高,表 2 对比了 GMR 电流驱动法与原来的电压驱动法实验结果,可见在小电流情况下,采用基于 GMR 的电流驱动法时,模块的工作效率明显提高.

表 2 不同驱动方法的输入功率对比

输出电压/电流	电压驱动		GMR 电流驱动	
	输入电压/电流	效率	模块输入	效率
3.3V/0.1A	24V/0.132A	10.42 %	24V/0.022A	62.5 %
3.3V/0.5A	24V/0.167A	41.25 %	24V/0.11A	62.5 %
3.3V/1A	24V/0.201A	68.4 %	24V/0.17A	81 %
3.3V/20A	24V/3.16A	87 %	24V/3.16A	87 %

5 结论

本文将新型的 GMR 电流检测技术应用到电流驱动型同步整流电路中,不仅能够克服传统电流检测方式带来的问题,而且充分发挥了电流驱动型同步整流技术的优越性能. GMR 电流检测技术可以应用到其它类型的电力电子变换器中,实现电流检测、过流保护等相关功能,因而 GMR 电流检测技术在电力电子系统中将有良好的应用前景.

参考文献:

[1] Zhou X, Wong P, Xu P, Lee F C, Huang A Q. Investigation of candidate VRM topologies for future microprocessors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(6) :1172 - 1182.

[2] 陈卢,石秉学,卢纯,代铁军,栗国星. 高效率同步整流式开关电源脉宽调制芯片的实现 [J]. 电子学报, 2000, 28 (12) :64 - 68.
Chen Lu, Shi Bingxue, Lu Chun, Dai Tiejun, Li Guoxin. Implementation of pulse width modulation chip for high-efficiency synchronous rectifying switching regulator [J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 28(12) :64 - 68. (in chinese)

[3] Xie X, Liu J C P, Poon F N K, Pong M H. A novel high frequency current-driven synchronous rectifier for low voltage high current applications [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Anaheim, USA, 2001. Vol. 1: 469 - 475.

[4] Xie X, Liu J C P, Poon F N K, Pong M H. A novel high frequency current-driven synchronous rectifier applicable to most switching topologies [J], IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(5) :635 - 648.

[5] Kohama T, Ninomiya T, Shoyama M, Tymerski R. Analysis of abnormal phenomena caused by synchronous rectifiers in a paralleled converter system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4) :670 - 680.

[6] Cheng D K W, Liu X C, Lee Y S. Parallel operation of DC-DC converters with synchronous rectifiers [A]. IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. Fukuoka, Japan, 1998, Vol.

- 2:1225 - 1229.
- [7] Archer W R. Current driven synchronous rectifier[J]. Electronics Design News, 1985, 30(11) :279 - 282.
- [8] Sakai E, Harada K. A new synchronous rectifier using bipolar transistor driven by current transformer [A]. Telecommunications Energy Conference [C]. Washington, USA, 1992. 424 - 429.
- [9] Acker B, Sullivan C R, Sanders S R. Current-controlled synchronous rectification [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Orlando, USA, 1994. Vol. 1 : 185 - 191.
- [10] 张之圣, 胡明, 刘志刚, 王文生, 白花珍, 王聪修. 磁阻效应及磁敏位置传感器[J]. 电子学报, 1996, 24(11) :122 - 124.
Zhang Zhisheng, Hu Ming, Liu Zhigang, Wang Wensheng, Bai Huazhen, Wang Congxiu. Magnetoresistive effect and a magneto position sensor[J]. Acta Electronic Sinica, 1996, 24(11) : 122 - 124. (in Chinese)
- [11] Baibich M N, Broto J M, Fert A, et al. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1988; 61(21) :2472 - 2475.
- [12] 魏朝刚, 任天令, 朱钧, 韦丹. 磁电子学研究概述[J]. 固体电子学研究进展, 2003, 23(4) :377 - 383.
- [13] Wei Chaogang, Ren Tianling, Zhu Jun, Wei Dan. Review of Magneto electronics[J]. Research & Progress of SSE, 2003, 23(4) :377 - 383. (in Chinese)
- [14] Xiao C, Zhao L, Asada T, Odendaal W G, van Wyk J D. An overview of integratable current sensor technologies [A]. IEEE Industry Applications Conference [C]. Salt lake city, USA, 2003, Vol. 2:1251 - 1258.

作者简介:

张波 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与交流传动系统的非线性分析和控制方向, 先后主持过国家自然科学基金、广东省自然科学基金、广东省重大攻关项目在内的各项纵向项目 20 余项, 在国内外重要刊物上发表论文 240 多篇, 其中被 SCI、EI、ISTP 收录 120 多篇. E-mail : epbzhang@sut.edu.cn

丘东元 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子装置.

E-mail : epdyqiu@scut.edu.cn

黄志刚 男, 硕士, 研究方向为电流检测技术和同步整流技术.