

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.015

基于 SiC 器件的高效率功率因数校正电源研究

范鹏飞, 肖 龙, 占金祥, 陈 浩, 陈国柱*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对传统有桥 Boost 功率因数校正电路效率不高的问题,分析了 Boost 功率因数校正电路的基本结构以及控制方法, SiC 器件的特点和发展历程,提出了使用 SiC 器件来提升其功率密度的方案。介绍了功率因数校正电路中重要参数的设计,简述了一种适用于 PFC 功率电感的设计方法以及主要设计步骤,并分析了传统有桥功率因数校正电路的损耗分布情况。选取了数家公司生产的不同材料的 MOSFET,搭建了对应的 1.2 kW 实验样机,并测量了各个样机效率。研究表明,在 115 V 交流输入下,相比 infineon 公司最新的具有超结结构的 CoolMOS, ROHM 公司的大电流 Si MOSFET,使用 SiC MOSFET 能够提升有桥功率因数电路的工作效率。

关键词:功率因数校正; SiC 器件; AC-DC 变换器

中图分类号: TM501⁺.1; TP461

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)04-0399-04

High efficiency power factor correction power supply based on SiC device

FAN Peng-fei, XIAO Long, ZHAN Jin-xiang, CHEN Hao, CHEN Guo-zhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the bridge Boost power factor correction circuit was not efficient. The basic structure and control method of Boost power factor correction circuit, the characteristics and development process of SiC device were analyzed, and the scheme of using SiC device to enhance its power density was proposed. The design of important parameters in power factor correction circuit was introduced. A design method for PFC power inductor was introduced. The design steps were analyzed and the loss distribution of traditional bridge power factor correction circuit was analyzed. Several MOSFETs with different materials were selected and the corresponding 1.2 kW prototype was set up, and the efficiency of each prototype was measured. The results indicate that compares with infineon's latest super-junction structure with CoolMOS, ROHM's high current Si MOSFET, the use of SiC MOSFET can improve the efficiency of the bridge power factor circuit.

Key words: power factor correction; SiC devices; AC-DC converter

0 引 言

为了降低电力电子设备对电网引入的谐波污染,世界各国陆续出台了对用电器电流谐波的相关规定,如欧洲的 IEC61000-3-2,中国的 GB17625.1 等。因此,有源功率因数校正(PFC)电路作为一种有效抑制电网谐波电流的技术被广泛应用。

电流连续模式控制的 Boost 电路被广泛地应用于整个电压输入范围内的 PFC 电路中。但是,目前常用的硅半导体 MOSFET 导通电阻和结电容都很大,输出

二极管严重的反向恢复问题降低了变换器的性能,限制了效率的提升。

近年来,以碳化硅为材料的宽禁带功率半导体器件因其所具备的优异性能而发展迅速,目前碳化硅 MOSFET 已经在光伏逆变器、电机驱动、车载充电电源等领域应用。相比传统的硅基器件,碳化硅器件具有更小的导通电阻,更快的开关速度,导通损耗以及开关损耗较小,可以达到更高的效率。

本研究将碳化硅 MOSFET 和碳化硅二极管应用于传统的 Boost 功率因数校正电路,对损耗进行理论

收稿日期:2016-11-29

作者简介:范鹏飞(1990-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事开关电源设计方面的研究。E-mail: fanpf90@gmail.com

通信联系人:陈国柱,男,工学博士,教授,博士生导师。E-mail: gzchen@zju.edu.cn

分析。并制作 1.2 kW 的样机,对比 3 种不同公司生产的 MOSFET,对分析结果进行验证。

1 Boost PFC 电路概述

1.1 Boost PFC 电路基本结构

功率因数校正电路可以分为有源与无源 2 类。其中无源校正方法一般使用在 300 W 以下的场合。常见的有源功率因数校正电路有升压式 (Boost)、降压式 (Buck) 以及升降压式 (Buck-Boost) 3 种,升压式 (Boost) 功率因数校正电路是目前主流的 PFC 电路,尤其在大功率应用中,其电路结构如图 1 所示。

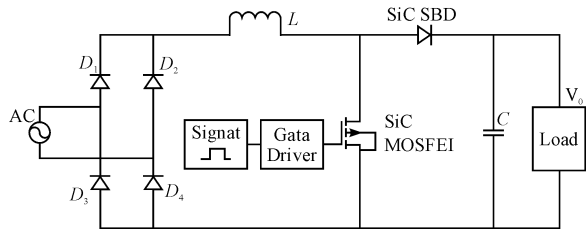


图 1 Boost PFC 基本拓扑

目前,升压式 (Boost) 功率因数校正电路常用的控制方法有滞环电流控制 (hysteretic current control)、峰值电流控制 (peak current control)、平均电流控制法 (average current control)^[1]。

其中,平均电流控制策略在功率因数校正电路中经常使用,电路工作在固定的工作频率下,电感电流的平均值跟随正弦的参考电流。其控制原理是通过电阻分压,将采样到的输出电压反馈信号与基准电压所产生的误差放大信号,和输入电压反馈送入乘法器,相乘之后的结果与电流采样信号一起通过电流误差放大器平均化,输入到 PWM 比较器中得到功率管的调制信号。

平均电流法控制下的电感电流波形如图 2 所示。

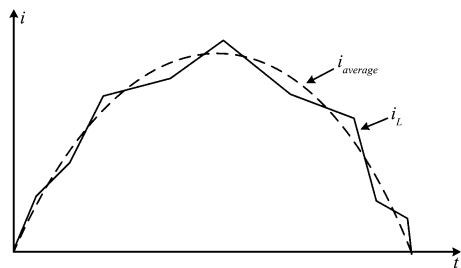


图 2 电感电流和控制参考电流波形

图 2 中实线为电感电流,虚线为平均电流。平均电流法的优点是开关频率恒定,THD 小,电磁干扰比较小,适用于大功率应用。缺点是在轻载时,输入电流在电压过零点附近会出现不连续的情况,导致电流波形严重失真^[2]。从图 2 中可以看出,在该控制方式下,功率器件的开通和关断都属于硬关断,会造成开关损耗增大,降低效率^[3]。

1.2 SiC 材料的介绍

在过去的几十年里,以 SiC 材料为代表的宽禁带材料发展迅速。20 世纪 70 年代第一个 SiC MOSFET 与二极管问世;2007 年 ROHM 公司发布了 SiC 外延薄膜量产技术;2012 年, CREE 公司和 ROHM 公司先后宣布了 SiC MOSFET 量产^[4]。根据 ROHM 公司提供的数据^[5], SiC 半导体材料可以实现产品的小型化,并提高产品效率,因而备受汽车生产企业、电气生产企业等的关注。

SiC 电力电子器件相比于传统的 Si 基器件,导通电阻更低、击穿电压更高、工作频率更高^[6],具有更低的结-壳热阻,散热性能更好,且能够在更高的温度下工作^[7]。虽然目前 SiC 器件的价格较高,但 SiC 电力电子器件在高频率、高效率以及工作温度要求苛刻的应用领域有广阔的应用前景。

2 关键参数设计及分析

笔者根据上述分析,搭建了一个 1.2 kW 升压式 (Boost) 功率因数校正电路模块。其中的重要参数设计过程如下。

2.1 PFC 电感优化设计

耦合电感是 Boost PFC 电路中设计最复杂的功率元件,且属于非标准元件,需要考虑电流、磁芯材料,结构等诸多关联参数,有较高的设计自由度,下面介绍一种综合的 PFC 电感设计方案。

(1) 首先根据 Boost 功率因数校正电路的工作要求,以及电流纹波限制,来确定相应的电感值。电路工作在 CCM 模式,电感值要求如下:

$$L \geq \frac{1}{\text{Ripple}\%} \cdot \frac{V_{\text{acmin}}^2}{P_{\text{in}}} \left(1 - \frac{\sqrt{2} \cdot V_{\text{acmin}}}{V_{\text{bus}}} \right) \cdot T \quad (1)$$

(2) 选择磁芯材料。功率电感设计中经常使用磁粉芯,具有气隙分布均匀、适合能量存储等特点。其中,铁硅铝 (Kool Mu) 是一种低损耗和相对高饱和度 (10 500 Gauss) 的材料,并且具有高储能、高温下性能稳定的优点。电感选用美磁公司的 Kool Mu 环形磁粉芯。

(3) 根据 AP 法以及体积因素,选择磁芯初始 AP 值。体积越大,对应磁环的 AP 值越大,根据体积确定 AP 值的上限,而体积由样机的结构,散热要求等决定。AP 值的计算公式:

$$AP_2 = \frac{LI_{\text{pk}} I_{\text{rms_max}}}{0.6 B_{\text{sat}} \cdot J_c K_u} \quad (2)$$

(4) 确定磁芯最大工作磁通密度

电感在工作的任何时刻都不能饱和,最大的磁感应强度需要小于设定的最大磁感应强度:

$$B_{\text{work_max}} \leq B_{\text{sat}} \quad (3)$$

$B_{\text{work_max}}$ 是在工作时磁感应强度最大值,由直流部分和交流部分组成:

$$B_{\text{ac}}(u_{\text{in}},n)=\frac{1}{2}\frac{u_{\text{in}}\left(1-\frac{u_{\text{in}}}{V_{\text{bus}}}\right)}{nA_{\text{a}}f_{\text{s}}}\tag{4}$$

在电压输入最低的时候取得最大值。

$$B_{\text{dc}}(i_{\text{in}},n)=\mu\left(\frac{ni_{\text{in}}}{l_{\text{e}}}\right)^2\tag{5}$$

(5) 确定窗口利用率

设定窗口利用率值 K_{μ} 。综合考虑电感电流值、导流密度、铜损等限制条件,选择相应的导线型号,计算 n 匝导线的窗口利用率 $K_{\mu}(n)$,其需要小于设定窗口利用率值 K_{μ} 。

综合以上五步分析,以电感量、磁感应强度、窗口系数为限制条件,并考虑成本,损耗等因素,可以确定相应的磁芯型号。

本研究最终选择美磁公司生产的 Kool Mu 磁粉芯 770 83,初始磁导率 60, $OD=39.9\text{ mm}$, $ID=24.1\text{ mm}$, $Ht=14.5\text{ mm}$,线圈匝数 52 匝,双环绕制而成。

2.2 输出电容设计

研究者通常选择大电解电容作为功率因数校正电路的输出电容,电容值的选择主要考虑维持时间以及纹波要求。维持时间是在电源关闭以后,输出电压仍然能保持在规定范围内的时间长度,在样机阶段主要考虑纹波限制。

稳态工作时, PFC 功率因数很高(0.95 以上),输入电流可以看作跟踪输入电压。后级负载视为恒定功率负载,在其峰值时电容纹波最大。输出电压纹波峰峰值较小,计算时可认为其输出电压恒定,综上,电容可由以下公式计算:

$$C_0\geqslant\frac{P_0}{2\cdot\pi\cdot f_{\text{line}}\cdot\Delta V_{\text{bus}}\cdot V_{\text{bus}}}\tag{6}$$

本研究选择 $V_{\text{bus}}=380\text{ V}$, $\Delta V_{\text{bus}}<0.05V_{\text{bus}}$, $P_0=1\,200\text{ W}$,计算母线电容值为: $C_0\geqslant 441\text{ }\mu\text{F}$ 。

最终选择两个 $470\text{ }\mu\text{F}/450\text{ V}$ 的电容并联。

2.3 SiC MOSFET 功率因数校正电路效率分析

根据前述分析,电路的设计参数如表 1 所示。

表 1 PFC 电路工作参数

参数	参数值
输出电压/ $(V_0\cdot\text{V}^{-1})$	380
输入电压/ $(V_1\cdot\text{V}^{-1})$	103~265
Boost 电感/ $(L\cdot\text{mH}^{-1})$	0.3
输出电容/ μF	940
额定输出功率/ kW	1.2
输入功率因数	>0.98

Boost 电路工作在连续电流模式下,根据电路工作条件,选取了 ROHM 公司型号为 SCT2080KE 的 SiC MOSFET 作为主开关管,同时选取其他两种 Si MOSFET 作为

对比,选取的 MOSFET 型号及其重要参数如表 2 所示。

表 2 3 种 MOS 管相关参数

器件类型	Si MOSFET	Si MOSFET	SiC MOSFET
产品编号	R6076ENZ1	IPW60R070P6	SCT2080KE
阻断电压/ V	600	650	1200
导通电流/ $\text{A}(100\text{ }^{\circ}\text{C})$	41	33.8	28
导通电阻 $R_{\text{d(on)}}$ / $\text{m}\Omega(130\text{ }^{\circ}\text{C})$	85	164	125

开关管的损耗主要由开通关断损耗、通态损耗构成,分别在不同开关工作频率的 MOSFET 损耗进行分析,结果如图 3 所示。

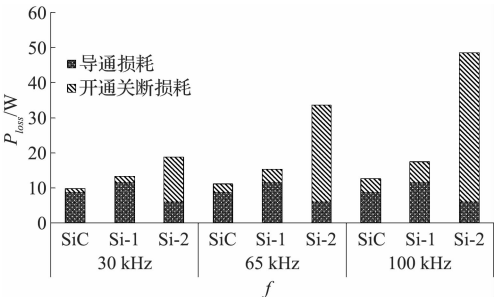


图 3 MOSFET 在不同开关频率下损耗分析

其中设定输出功率 1.2 kW ,输入电压 115 V 。图 3、表 2 中 SiC 对应的是型号是 R6076ENZ1, Si-1 对应的型号是 IPW60R070P6, Si-2 对应的型号是 SCT2080KE。

从图 3 和表 2 中可以看出,与导通电流近似的 MOSFET 相对比, SiC 器件的导通电阻、导通损耗更小,并且开通关断损耗更小,相比传统 MOSFET 有较大优势,随着开关频率的升高,优势更加明显。此外, infineon 公司生产的具有超结结构的第六代 MOSFET 性能也十分优越,可以在考虑成本的时候选用。

整体上看, SiC MOSFET 具有更大优势,尤其在开关频率较高的场合。

整个电路的损耗主要由整流桥、开关管、电感以及二极管等部分构成。

计算得出损耗的分布情况如图 4 所示。本研究在进行分析时,假设电路输入电压为 115 V ,输出功率 1.2 kW 。

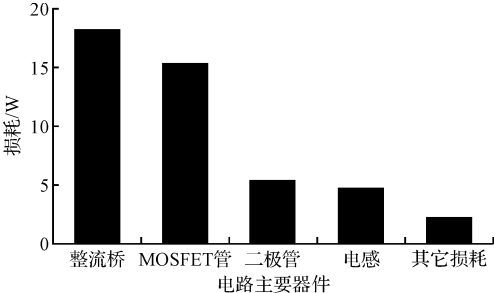


图 4 SiC 功率因数校正损耗分布

从图 4 中可以看出,功率主要在整流桥和开关管处消耗,通过选取导通电阻更低、开通关断损耗更小的

开关管,可以显著提升功率因数校正电路的效率。

3 实验及分析

笔者搭建了一个 1.2 kW 的实验平台,进行相关实验。控制芯片采用 TI 公司的 UCC28019A 芯片。实验平台如图 5 所示。

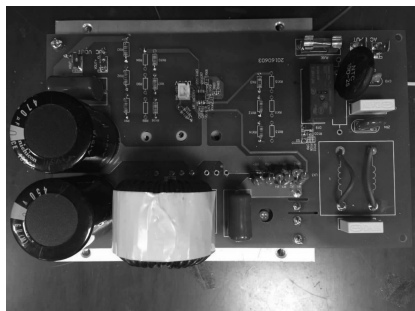


图 5 实验平台

实验结果表明,电路工作正常,工作时输入电流电压波形如图 6 所示。

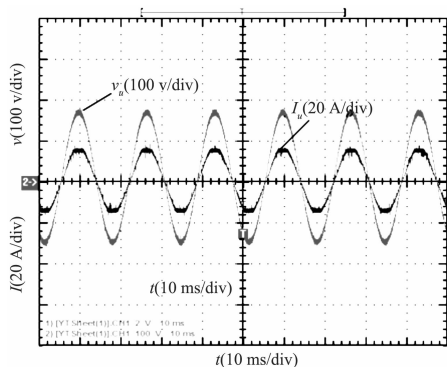


图 6 电路输入电流电压波形

笔者测量了功率因数校正电路各个功率等级下的效率,并绘制了效率曲线,实验时输入电压保持在 115 V,测量结果如图 7 所示。

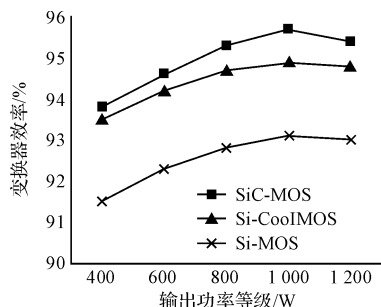


图 7 不同功率等级下整体电路的效率

实验结果说明,使用 SiC MOSFET 在各个功率等级下都能够有效提高效率,在输出功率为 1 kW 时,使用 ROHM 公司型号为 SCT 208 0KE 的 SiC MOSFET,相比 infineon 的 CoolMOS,整机效率提升 0.7%,相比 ROHM 公司的 Si MOSFET,整机效率提升 2%。实验结果表明本研究之前的分析正确,依靠 SiC 器件导通电阻更低、导通损耗小、开关损耗低的特点,可以提升传统有桥功率因数校正电路的效率。

4 结束语

本研究分析了功率因数校正电路的拓扑结构以及控制方式,分析了功率因数校正电路主要参数及器件的设计,搭建了 1.2 kW 的样机。

分析和试验结果表明,利用 SiC MOSFET 开关速度快,通态电阻小等相关特性,与 SiC 二极管相配合,应用在 PFC 变换器中,可有效提高其功率密度,可作为相关电气设计人员设计高效率电源的设计参考。

参考文献 (References):

- [1] WEN Y, TRESCASES O. Analysis and comparison of frequency stabilization loops in self-oscillating current mode DC-DC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(28): 4753-4766.
- [2] SINGH B, SINGH S. Isolated Zeta PFC converter based voltage controlled PMBLDCM drive for air-conditioning application[C]// India International Conference on Power Electronics. New York: IEEE, 2011.
- [3] ZHONG X, WU X, ZHOU W, et al. An all-sic high frequency boost DC-DC converter operating at 320 °C junction temperature[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(10): 1-1.
- [4] APEI. HT-2000 series. [M/OL] Fayetteville: APEI, 2012. <http://www.apei-net>.
- [5] ROHM. Sic power devices[M/OL]. kyoto: ROHM, 2012. <http://www.rohm.com>.
- [6] EVANS T, HANADA T, NAKANO Y, et al. Development of sic power devices and modules for automotive motor drive use[C]//IEEE International meeting for Future of Electrnic Devices, Kansai: IEEE, 2013.
- [7] 陈治明, 李守智. 宽禁带半导体电力电子器件及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

范鹏飞, 肖 龙, 占金祥, 等. 基于 SiC 器件的高效率功率因数校正电源研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(4): 399-402.

FAN Peng-fei, XIAO Long, ZHAN Jin-xiang, et al. High efficiency power factor correction power supply based on SiC device[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(4): 399-402.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>