

Boost PFC 电路辐射 EMI 分析与抑制研究

鲍怡伶¹, 张浩然², 赵 阳³

(1.江苏省医疗器械检验所, 江苏 南京 210016)

(2.盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城 224051)

(3.南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 功率因数校正(power factor correction, PFC)变换器产生的电磁干扰对集成电路造成了严重影响, 能否快速的解决 PFC 变换器的 EMI 问题, 对设备的安全稳定运行至关重要. 以 Boost PFC 电路作为研究对象, 分析其电路结构并在电路软件中搭建模型, 提取电路中噪声源电流, 结合辐射噪声计算公式, 对电路模型进行场路协同仿真, 得到噪声频谱, 并在此基础上提出辐射抑制措施.

[关键词] Boost PFC 电路, 电磁辐射, 仿真研究, 抑制措施

[中图分类号] TM933 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)04-0075-06

Research on Radiation Electromagnetic Interference Analysis and Suppression of Boost PFC Circuit

Bao Yiling¹, Zhang Haoran², Zhao Yang³

(1.Jiangsu Medical Device Inspection Institute, Nanjing 210016, China)

(2.School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

(3.School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The electromagnetic interference caused by a power factor correction(PFC) converter has made a great influence on the integrated circuit, and whether to rapidly solve the EMI problem of a PFC converter is vital to the safe and stable operation of the device. Therefore, this paper takes Boost PFC circuit as the research object, analyzes its circuit structure and builds a model in circuit software, extracts the noise source current in the circuit, combines the radiation noise calculation formula, and performs field-path co-simulation on the circuit model to obtain the noise spectrum. Based on this, radiation suppression measures are proposed.

Key words: Boost PFC circuit, electromagnetic radiation, simulation study, suppression measure

近几年来现代电力电子技术、信息化技术发展迅猛, 开关电源作为高可靠性的电力电子装置得到广泛的应用, EMI 对于现代电力电子装置的影响也越来越大^[1-3]. 由于分布电容、开关电源电路结构、高频变压器、整流电路等产生了大量的辐射骚扰问题, 这些超标噪声不仅影响周围电子设备, 也给自己自身带来了严重危害. 而作为开关电源中的主要部分 Boost PFC 吸引了许多学者进行研究, 其 MOSFET 和二极管的开断切换更是电磁干扰噪声的主要来源之一^[4-8].

在电路的设计中, 工程师首先考虑的就是 Boost PFC 变换器的电磁兼容问题, 提前对产品可能的噪声源进行预测与辐射评估, 提出有效的解决方案, 减少对产品投资, 有效减小噪声干扰对设备的影响, 确保产品通过电磁兼容的相关测试.

1 Boost PFC 电路原理及辐射分析

1.1 Boost PFC 电路原理分析

图 1 展示了 Boost 升压电路图, 我们用 V_s 表示输入直流电压, 用 Q_s 表示 MOSFET 开关管, 用 L_o 表示升压电感, C_o 为输出电容, 单项导通二极管表示为 D_b , R 为负载.

通过判断电流是否连续, Boost 开关电源被概括成临界连续模式(CRM)、电流断续模式(DCM)、连续导通模式(CCM)。

对于电流的一个周期, 连续导通模式特征为电感电流不等于 0。开关电源为断续模式的特征为电感电流等于 0。当开关电源在临界连续模式下工作时, 控制器检测电感电流值, 当电流等于 0, 开关关闭。本文主要研究断续模式, DCM 模式下电能转换效率更高, 由于传递系数 M 和负载电流有关, 因此通过调节电感的大小以及占空比就可以使开关电源在 DCM 模式下进行工作。

设输入电压为 $V_s = V_m \sin(\omega t)$, 式里的 V_m 表示电压峰值, ω 表示角频率, 则 $|V_s(t)| = V_m |\sin(\omega t)|$ 。

开关电源在正常工作时频率可达几十到上百 Hz, 为了方便理论研究, 本文只研究在一个周期内的电感电流变化。已知 V_s 不变, 输入电流值等于电感平均电流。在二极管处于导通状态情况下, I_{LPK} 随时间的增加缓慢增长。当时间为 $D_1 T$ 时, 电流达到最大

$$I_{LPK}(t) = \frac{V_m |\sin(\omega t)|}{L_0} T_{on}. \quad (1)$$

对一个周期内的 I_{LPK} 进行积分, 可得平均电流

$$I_{Lav}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} I_{LPK}(t) (T_{on} + T_{off}) dt = \frac{1}{2} I_{LPK}(t) (D_1 + D_2). \quad (2)$$

由于电感电流充放电时保持守恒定律, 可得

$$\frac{V_0 - V_m |\sin(\omega t)|}{L_0} D_2 T = \frac{V_m |\sin(\omega t)|}{L_0} D_1 T. \quad (3)$$

将 $t_{on} = D_1 T, t_{off} = D_2 T$ 代入(3)中, 可得

$$D_2 = \frac{V_m |\sin(\omega t)|}{V_0 - V_m |\sin(\omega t)|} D_1. \quad (4)$$

式(2)和(4)联立, 则电感平均电流为

$$I_{Lav}(t) = \frac{V_m T D_1^2}{2L_0} \frac{V_0 |\sin(\omega t)|}{V_m - V_0 |\sin(\omega t)|}, \quad (5)$$

则输入电流为

$$I_{in}(t) = \frac{V_m T D_1^2}{2L_0} \frac{\sin(\omega t)}{1 - \frac{V_m}{V_0} |\sin(\omega t)|}. \quad (6)$$

结合功率表达式, 可推出平均输入功率为

$$P_{in} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{in}(t) I_{in}(t) dt = \frac{V_m^2 T D_1^2}{2\pi L_0} \cdot \int_0^\pi \frac{\sin(\omega t)}{1 - \frac{V_m}{V_0} |\sin(\omega t)|} d(\omega t). \quad (7)$$

最后, 可计算出功率因数数值大小为

$$\frac{P_{in}}{V_{in_rms} I_{in_rms}} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^\pi \frac{\sin(\omega t)}{1 - \frac{V_m}{V_0} |\sin(\omega t)|} d(\omega t)}{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin(\omega t)}{1 - \frac{V_m}{V_0} |\sin(\omega t)|} \right)^2 d(\omega t)}}. \quad (8)$$

由功率因数数值可知, 开关电源工作在断续模式下时, 其功率因数数值与 V_m 与 V_0 有关, 且功率因数数值随

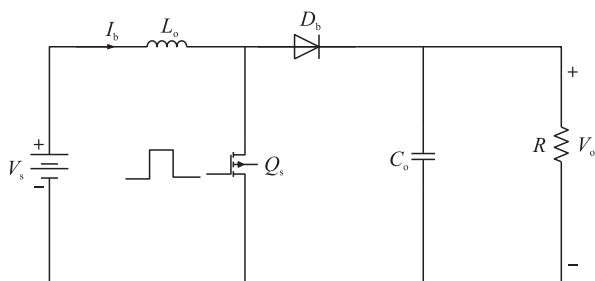


图 1 Boost 升压电路图

Fig. 1 Boost circuit diagram

V_m/V_o 值增大而减小。

1.2 Boost PFC 电路辐射分析

开关电源电路的辐射分为差模辐射和共模辐射。差模辐射是由成环的差模电流引起的辐射,由于两条相对迹线的电流方向相反,量值相同,它们的辐射是相互消弱的。因此差模电流本身尽管量值较大,但引起的辐射却较小。共模辐射是共模电流产生的辐射,共模电流大小通常比差模电流小几个量级,但由于两迹线共模电流方向相同,两迹线的共模电流引起的辐射场是相互叠加的,因此会比差模电流产生更大的辐射^[9]。

因为研究需要代入开关电源电路的现实尺寸,我们可以使其看作长为 l 的辐射天线。又因在电路中辐射天线波长值远小于高频噪声电流波长,则得 $l \leq \lambda/20$,所以可将其辐射天线用偶极子天线模型表示。根据偶极子天线模型理论,以及麦克斯韦方程组等可推得,电偶极子产生的共模辐射 EMI 噪声为

$$E_{CM} = 12.6 \times 10^{-7} \frac{f I_{CM}}{r} \tag{9}$$

式中, I_{CM} 是辐射天线中的共模电流, r 为测试距离, l 为辐射天线长度。

磁偶极子产生的差模 EMI 辐射噪声:

$$E_{DM} = 2.632 \times 10^{-14} \frac{f^2 A I_{DM}}{r} \tag{10}$$

式中, I_{DM} 为辐射天线中的差模电流, A 为辐射天线面积。

2 Boost PFC 仿真模型搭建

对于电力电子器件,其仿真软件有很多种。本文主要结合 PSIM 电路仿真软件,对开关电源 Boost PFC 部分进行仿真实验,设计参数如表 1 所示^[10-11]。

依据电路指标设计电路参数,电路的输入电压为 220 V,滤波和整流电路连接在主电路与负载之间,将交流电变为直流电,DCM 工作模式下的电路图如图 2 所示。

表 1 DCM Boost PFC 设计指标
Table 1 DCM Boost PFC design indicators

参数	值
输入电压范围	90 V_{ac} ~ 265 V_{ac}
输入电压 V_s	220 V_{ac} / 50 Hz
输出电压 V_o	420 V
最小开关频率	40 kHz
额定输出功率	500 W

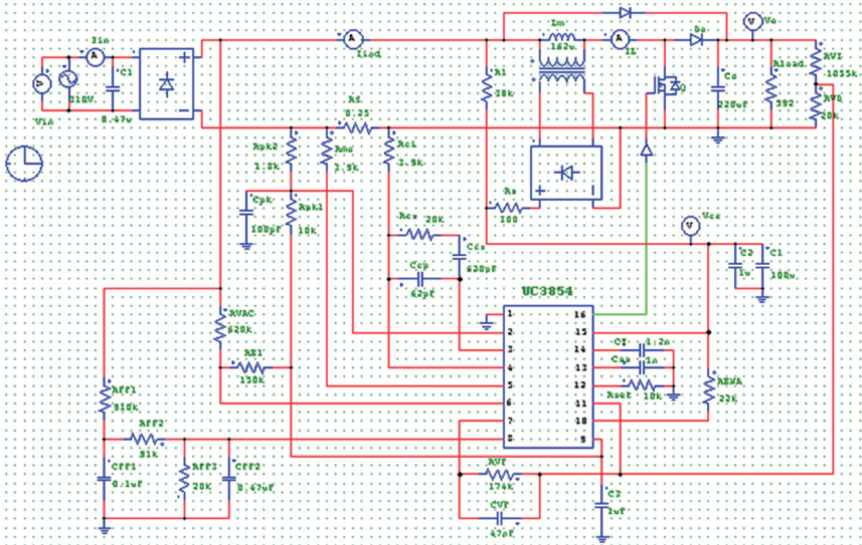


图 2 DCM Boost PFC 电路图
Fig. 2 DCM Boost PFC circuit diagram

本实验选用型号为 UC3854 的控制芯片,采用平均电流控制 PFC 的方法,功率因数可达 0.89 以上,该芯片将电压误差放大器输出信号与经过整流桥的输出端检测信号相乘的结果作为电流基准信号,并将该信号通过电流误差放大器进行放大,输出结果与锯齿波进行对比,从而产生 PWM 脉冲信号来控制开关管

的开断. 实现了电压外环控制, 电流内环控制, 从而达到提高功率因数数值的效果.

经过 Boost 电路升压后, DC 端输出电压为 420 V 左右, 如图 3 所示.

3 Boost PFC 辐射抑制研究

Boost PFC 电路在工作时, 其中的开关管以很高的频率不断的导通和关断, 且电路中存在的电感保持其自身电流不变, 使得电路中发生电流和电压突变的情况. 电流电压突变本质上是其电介质电荷和电流密度的变化, 这些变化会向外辐射电磁波, 且电压电流变化率越大, 其辐射强度越大.

辐射 EMI 以电磁场的形式传播, 其噪声产生的机理更加复杂, 对周围敏感设备造成了严重的影响. 由于开关管的工作频率极高, 因此电流或电压信号的变化波形可以等效为一个冲击信号, 而且开关管动作频率越高, 其脉冲越接近冲击波. 冲击波成为辐射干扰的主要表现形式, 对其他电路和自身产生了严重危害.

上一节所仿真得到的流过 Boost 主回路开关管上电流波形图, 如图 4 所示.

本文把开关电源频率设定为 0~50 MHz, 符合实际应用中的工作状态. 首先提取辐射 EMI 噪声电流, 并将其分离为共模辐射电流和差模辐射电流, 然后分别代入噪声式(9)和式(10)中, 求出辐射 EMI 噪声值. 设定相关测试参数如下: 共模天线长度 $l=3$ cm, 环路面积 $s=25$ cm², 测试距离 $r=3$ m, 得图 5 所示的电场辐射噪声频谱图.

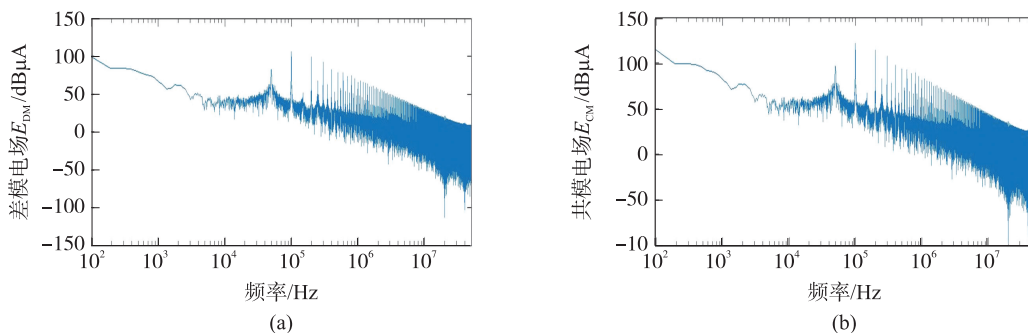


图 5 DCM Boost 主电路电场辐射噪声频谱图

Fig. 5 DCM Boost main circuit electric field radiation noise spectrum

本实验测试距离设定为 0.5 m, 共模天线长度为 3 cm, 将高频电流值代入辐射 EMI 公式, 得如图 6 所示的主电路磁场辐射噪声频谱图.

为了对比出主要噪声, 其对比图如图 7 所示. 可以明显看出在 DCM Boost 主电路中其受到的电场辐射远大于磁场辐射, 其辐射噪声随着频率的升高而降低, 其噪声影响较大频段在 100 Hz~1 MHz 之间, 而此频段也是实际开关电源工作频段. 该处噪声需要作抑制处理.

为了抑制 DCM Boost 主电路噪声, 在主电路开关 MOSFET 管处并联 500 pF 电容 C_s , 细节电路图如 8 所示, 其辐射噪声频谱如图 9 所示^[12].

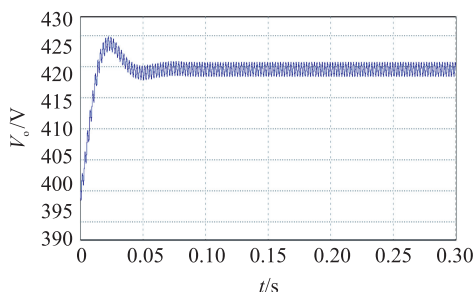


图 3 DC 端输出电压波形

Fig. 3 DC output voltage waveform

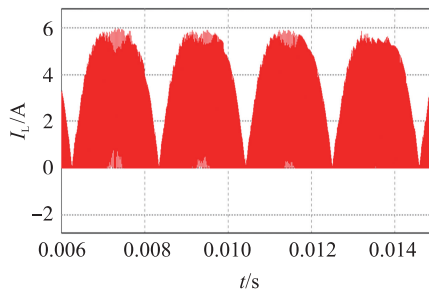


图 4 流过 Boost 主回路开关管上电流波形图

Fig. 4 Current waveform diagram flowing through the Boost main loop switch

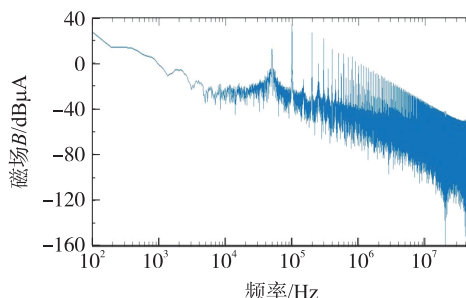


图 6 DCM Boost 主电路磁场辐射噪声频谱图

Fig. 6 DCM Boost main circuit magnetic field radiation noise spectrum

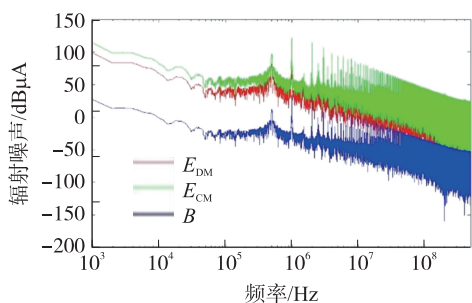


图 7 DCM Boost 主电路辐射噪声频谱图

Fig. 7 DCM Boost main circuit radiation noise spectrum

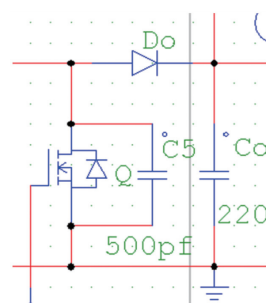
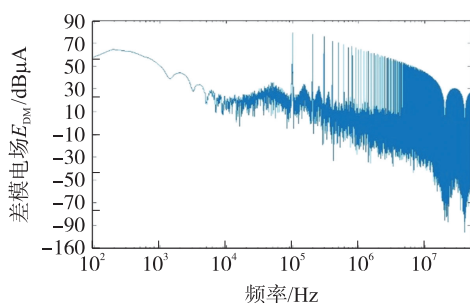


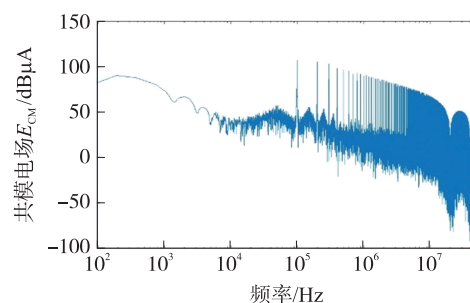
图 8 DCM Boost 主电路 MOS 管并联电容的细节图

Fig. 8 DCM Boost main circuit MOS tube shunt capacitor details

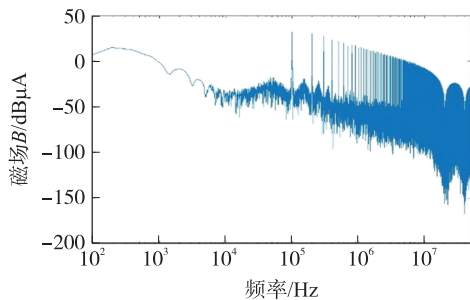
由图 8 可知,该处噪声主要以电场噪声为主,且差模噪声大于共模噪声,整体噪声呈现下降趋势,可以看出主电路开关管并联电容可以实现对辐射噪声的抑制,其电场和磁场噪声都有所下降,尤其是低频段的噪声抑制效果最为明显,因此电容具有降低辐射噪声的作用。



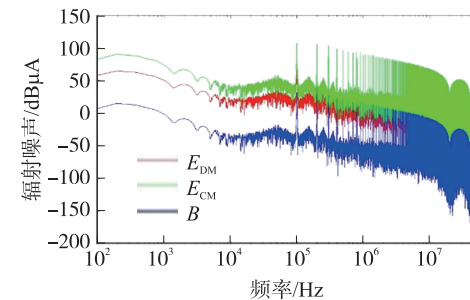
(a) 差模电场频谱图



(b) 共模电场频谱图



(c) 磁场频谱图



(d) 辐射噪声频谱图

图 9 DCM Boost 主电路 MOS 管并联电容的辐射噪声频谱图

Fig. 9 Radiation noise spectrum of DCM Boost main circuit MOS tube shunt capacitor

4 结语

本文以 Boost PFC 电路作为研究对象,首先分析了其电路结构及理论推导,并利用 PSIM 软件搭建仿真模型,使得输出稳定在 420 V. 然后分析了 Boost PFC 电路中开关管影响辐射发射的原因,并提取了电路中开关管的噪声源电流,结合辐射噪声机理研究和公式,对电路模型进行场路协同仿真,得到噪声频谱. 最后,提出了辐射抑制措施,在开关管两端并联电容,可有效地降低辐射噪声。

[参考文献] (References)

- [1] COSTA F, GAUTIER C, LABOURE E, et al. Electromagnetic compatibility in power electronics[M]. ISTE, 2014.
- [2] 赵阳, SEE K Y. 电磁兼容基础与应用: 英文版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 3-20.
ZHAO Y, SEE K Y. Electromagnetic compatibility basics and applications[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 3-20. (in Chinese)

- [3] 钱照明,陈恒林. 电力电子装置电磁兼容研究最新进展[J]. 电工技术学报,2007 22(7):1-11.
QIAN Z M, CHEN H L. State of art of electromagnetic compatibility research on power electronic equipment[J]. Transactions of China electro technical society, 2017, 22(7):1-11. (in Chinese)
- [4] HERTZ E M, BUSQUETS M S, BOROYEVICH D, et al. Analysis of the tradeoffs between thermal behavior and EMI noise levels in a Boost PFC circuit[C]//IEEE Industry Applications Society Conference. Chicago, IL, USA, 2001:2460-2465.
- [5] YANG L Y, LU B, DONG W, et al. Modeling and characterization of a 1kW CCM PFC converter for conducted EMI prediction [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim, CA, USA, 2004:763-769.
- [6] WU X, PONG M H, LU Z Y, et al. Novel boost PFC with low common mode EMI; modeling and design[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA, 2000:178-181.
- [7] ZHANG D B, CHEN D, SABLE D. Non-intrinsic differential mode noise caused by ground current in an off-line power supply [C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Fukuoka, Japan, 1998:1131-1133.
- [8] BASSO C, 巴索, 吕章德. 开关电源仿真与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2015.
BASSO C, BA S, LÜ Z D. Switching power supply simulation and design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 复杂电子系统辐射 EMI 噪声机理分析与抑制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):173-180.
YAN W, ZHAO Y, WANG E R, et al. Noise mechanism analysis and suppression for radiated electromagnetic interference noise[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15):173-180. (in Chinese)
- [10] 杨脱颖. 基于 PSIM 仿真的开关电源 Boost 电路的设计[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(11):163-164, 168.
YANG T Y. Design of switching power supply boost circuit based on PSIM simulation[J]. Industrial control computer, 2018, 31(11):163-164, 168. (in Chinese)
- [11] 高伟俊,陈乾宏. 断续模式无桥 Boost PFC 变换器的研究[J]. 电源学报, 2017, 15(4):173-182.
GAO W J, CHEN Q H. Research of bridgeless boost PFC in DCM mode[J]. Journal of power supply, 2017, 15(4):173-182. (in Chinese)
- [12] 陈恒林,凌光,黄华高,等. Boost 变流器门极驱动电路的 EMI 发射及抑制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 25(5):98-102.
CHEN H L, LING G, HUANG H G, et al. Emission and suppression of EMI from gate drive circuit of boost converter[J]. Journal of Zhejiang university(engineering edition), 2010, 25(5):98-102. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]