

驱动噪声对开关电源传导 EMI 的影响

姜宁秋¹ 赵 阳^{1,2}

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

[摘要] 分析了电路电流路径,在此基础上提出了一种基于驱动噪声开关电源电磁干扰分析模型,该模型可以用于分析驱动电路噪声对开关电源电磁干扰的影响.同时在机理分析的基础上进行了试验,试验结果证明了模型的正确性和有效性.

[关键词] 模型,电磁干扰,驱动噪声,开关电源

[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-4292(2011)03-0001-05

The Influence of the Drive Noise on the Conducted EMI of SMPS

Jiang Ningqiu¹, Zhao Yang^{1,2}

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. State Key Laboratory of Millimeter Waves Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The current path of the circuit is analyzed. On that basis, a new analysis model of the conducted EMI based on the drive noise is presented, which can be used to analyze the influence of the drive noise on the conducted EMI of SMPS. At the same time, experiment is conducted on the basis of the mechanical analysis. The result of experiment shows that the model and the analysis are correct and effective.

Key words: model, EMI, drive noise, SMPS

由于开关电源具有高功率密度、高效率等优点,目前已经广泛应用在计算机、电视机、通信设备、控制装置等设备之中.并且随着功率半导体器件如 MOSFET、IGBT 的发展和开关技术的进步,开关电源的开关频率和功率密度不断上升.这些导致开关电源内部的电磁环境越来越恶劣,同时对周围的电子设备及电源本身的正常工作也造成威胁.因此,降低开关电源的 EMI 成为开关电源设计中的重要课题之一.

开关电源的 EMI 研究主要包括传导性噪声分离测量技术、噪声源建模研究、噪声源机理研究及噪声抑制技术等方面.在噪声机理研究方面,国内外很多文献^[1-6]从传导噪声源传播途径和门极驱动等方面入手,对电磁干扰在频谱方面进行了分析研究,对比了在不同的开关频率、驱动电阻、输入电压、负载电流等参数下,差模、共模和总传导噪声干扰的变化.在目前的传导噪声机理研究中,都没有对驱动电路噪声影响作详细的分析.本文以 Boost 变换器为例,分析驱动电路对电磁干扰的影响,提出了基于驱动噪声的电磁干扰分析模型,该模型可以用于分析驱动电路噪声对开关电源电磁干扰的影响,利用该模型进行了传导性共模干扰和差模干扰产生机理的研究.最后,本文还在机理分析的基础上进行了仿真和实验验证.

1 基于开关电源驱动噪声的 EMI 分析模型理论

1.1 差模干扰模型分析

对于连续导电模式和临界连续模式的 Boost 电路,某一时刻整流桥中总有一对二极管是导通的,如 D_1 和 D_4 ,或者 D_2 和 D_3 同时导通,因此差模干扰电流传播途径如图 1 所示.图中 C_{gd} 为 MOSFET 漏极 d 和栅极 g 间的寄生电容, C_{gs} 为 MOSFET 源极 s 和栅极 g 间的寄生电容.根据图 1 可得到简化差模干扰耦合路径

收稿日期: 2010-06-10.

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008429)、毫米波国家重点实验室开放基金(K201106).

通讯联系人: 赵 阳,教授,博士生导师,研究方向: 电磁兼容. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

模型,如图 2 所示.

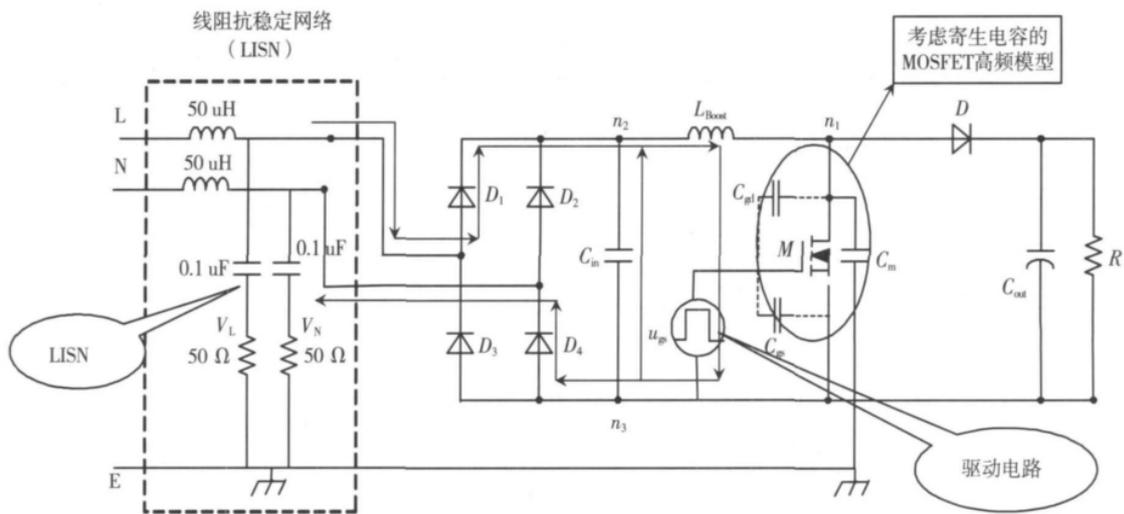


图 1 Boost 电路的差模干扰电流传播途径

Fig.1 Differential interference current transmission mode of Boost circuit

由图 2 可得频域表示的差模干扰电流

$$I_{DM}(f) = \frac{V_{gs}(f) Z_{C_{in}}}{Z_L Z_{C_{in}} + Z_L R + Z_d Z_{C_{in}} + Z_{C_{gd}} R + Z_{C_m} R} \quad (1)$$

由式(1)可见 驱动电路噪声 u_{gs} 、输入电容 C_{in} 、电感 L_{Boost} 及漏极 d 和栅极 g 间的寄生电容 C_{gd} 都是差模干扰的影响因子. 通过式(1) 可以分析不同参数条件下 差模噪声的变化规律.

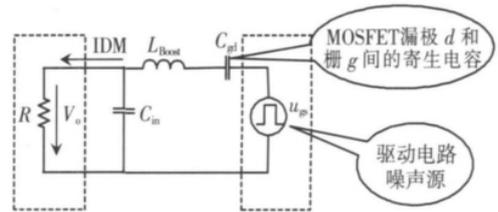


图 2 Boost 电路的差模干扰分析模型

Fig.2 Differential interference analysis model of Boost circuit

1.2 共模干扰新模型分析

以工作于临界断续 Boost 变流器为例来说明功率变流器中共模干扰产生的原因,如图 3 所示. 功率开关器件 MOSFET 的开关工作产生了两个结果: 一是产生沿着 Boost 电感器、电容器 C_{in} 、开关管流动的高频电流环. 由于电容器 C_{in} 等效串联电感(ESL) 和等效串联电阻(ESR) 的存在,一部分不能被滤去的高频电流将流入 LISN, 形成差模干扰电流; 二是导致 MOSFET 的漏极以及与漏极相连的 PCB 导线(图中 n_1 节点) 之电位高频变化,其结果是形成位移电流. 这些位移电流是产生共模干扰电流的直接因素. 对于散热器接地的系统,功率管与散热器间的寄生电容 C_m 以及 LISN 构成了共模干扰电流的通道. 注意本文规定当共模电流平衡时,其流过 L、N 线的大小相等、方向相同,即图 3 中的 i_{cm} , 而流过地线的共模电流则为 $2i_{cm}$. 根据图 3 可得到简化共模

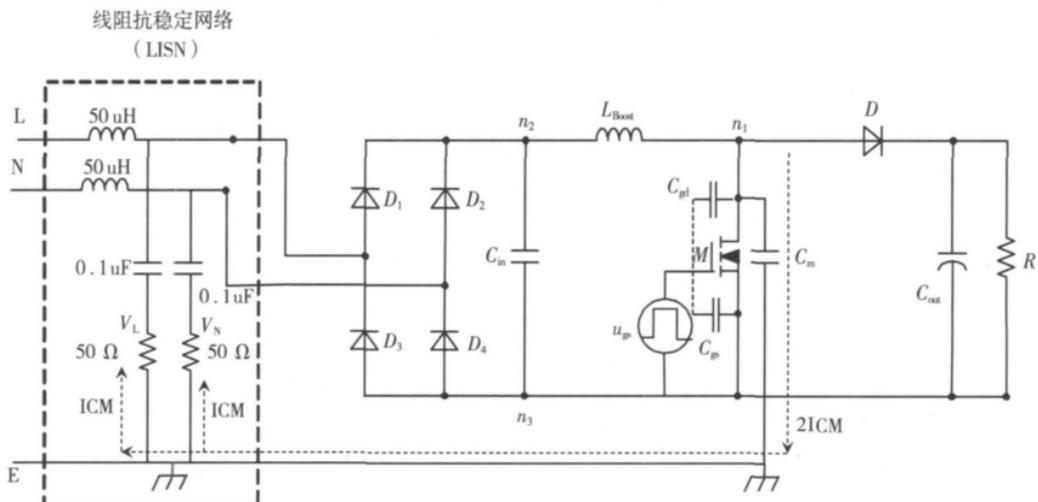


图 3 Boost 电路的共模干扰电流传播途径

Fig.3 Common interference current transmission mode of Boost circuit

干扰耦合路径模型 如图 4 所示.

由图 4 可得频域表示的共模干扰电流:

$$I_{CM}(f) = \frac{V_{gs}(f)}{Z_{C_m} + Z_{C_{gd}} + R'} \quad (2)$$

由式(2)可见,驱动电路噪声 u_{gs} 、功率管与散热器间的寄生电容 C_m 及栅极 d 和栅极 g 间的寄生电容 C_{gd} 都是共模干扰的影响因子. 通过式(2)可以分析不同参数条件下,共模噪声的变化规律.

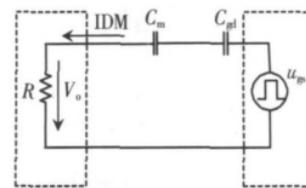


图 4 Boost 电路的共模干扰分析模型

Fig.4 Common interference analysis model of Boost circuit

2 驱动噪声信号的频谱特性分析

开关电源中的开关器件在其关断时,电压/电流的变化率都很大,会造成很大的干扰.有些开关器件的驱动信号是梯形信号,但实际上不存在这一类信号.常见的都是有一定上升和下降时间的信号.在设计电路时,为了提高响应速度,一般会选择上升和下降时间较短的驱动信号.这些信号将会产生更大的干扰.这些干扰通过电路中的寄生参数会对电路产生影响.为了不失一般性,先研究不对称梯形信号.不对称梯形信号如图 5 所示,该信号的幅度频谱公式为^[7]:

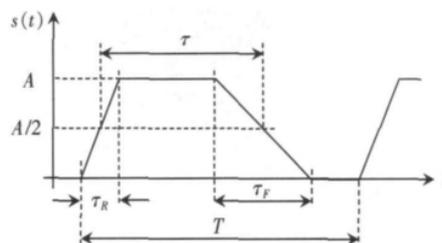


图 5 不对称梯形信号

Fig.5 Asymmetric trapezoidal signal

$$S(k) = \frac{A}{\pi k} | si(\pi k R) e^{j\pi k d} - si(\pi k F) e^{-j\pi k d} |, \quad (3)$$

其中 $si(x) = \sin(x)/xR = \frac{\tau_R}{T}$ 相对于上升时间; $F = \frac{\tau_F}{T}$ 相对于下降时间; $d = \frac{\tau}{T}$ 相对于平均脉宽,即占空比. 为避免两次脉冲发生重叠 d, R, F 必须满足 $d + R + F \leq 1$ 且 $R + F \leq \frac{d}{2}$.

对式(3)作如下分析:

低频段

对于基频信号,可近似为:

$$S(1) = \frac{A}{\pi} \sqrt{(si(\pi R) + si(\pi F))^2 \sin^2(\pi d) + (si(\pi R) - si(\pi F))^2 \cos^2(\pi d)}. \quad (4)$$

对于低频段,上升时间、下降时间可忽略,即 $R, F \rightarrow 0$, 则 $si(\pi k R) \approx si(\pi k F) \approx 1$, 所以,低频段幅度频谱可近似为:

$$S(k)_{LF} = \frac{2A}{\pi k}, \quad (5)$$

由此可见,在低频段频谱幅值与梯形波幅值成正比.

中频段

中频段幅度频谱可近似为:

$$S(k)_{MF} = \frac{A}{\pi k} \left(1 + \frac{1}{\pi k \alpha}\right), \quad \alpha = \begin{cases} R, & \text{当 } R > F \text{ 时,} \\ F, & \text{当 } F > R \text{ 时,} \end{cases} \quad (6)$$

由此可见,若 $R > F$, 则频谱幅值与梯形波幅值成正比,与 R 成反比.

高频段

高频段时,由于 $|si(\pi k R)| \leq \left|\frac{1}{\pi k R}\right|$, $|si(\pi k F)| \leq \left|\frac{1}{\pi k F}\right|$, 式(3)可以近似为:

$$S(k)_{HF} = \frac{A}{\pi^2 k^2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{F}\right). \quad (7)$$

由此可见,此时的频谱幅值与梯形波幅值成正比,与 R 成反比.

综上所述,频率不变时,随着上升时间增加, R 增加,则中频段和高频段的频谱幅值减小,则产生 EMI 噪声减小.

3 实验结果

通过上述电磁干扰分析模型,可以了解驱动噪声对开关电源传导 EMI 噪声的影响. 同样,由所得到的结论可以提出相应的噪声抑制的措施,并通过实验验证.

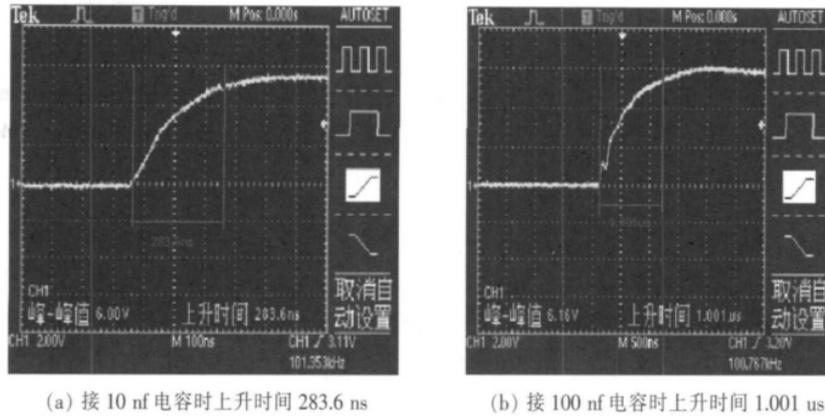


图 6 驱动电路输出端分别接 10 nF 和 100 nF 电容时的 u_{gs} 波形

Fig.6 Waveform of u_{gs} while Drive circuit output port connect to capacitance respectively with 10 nF and 100 nF

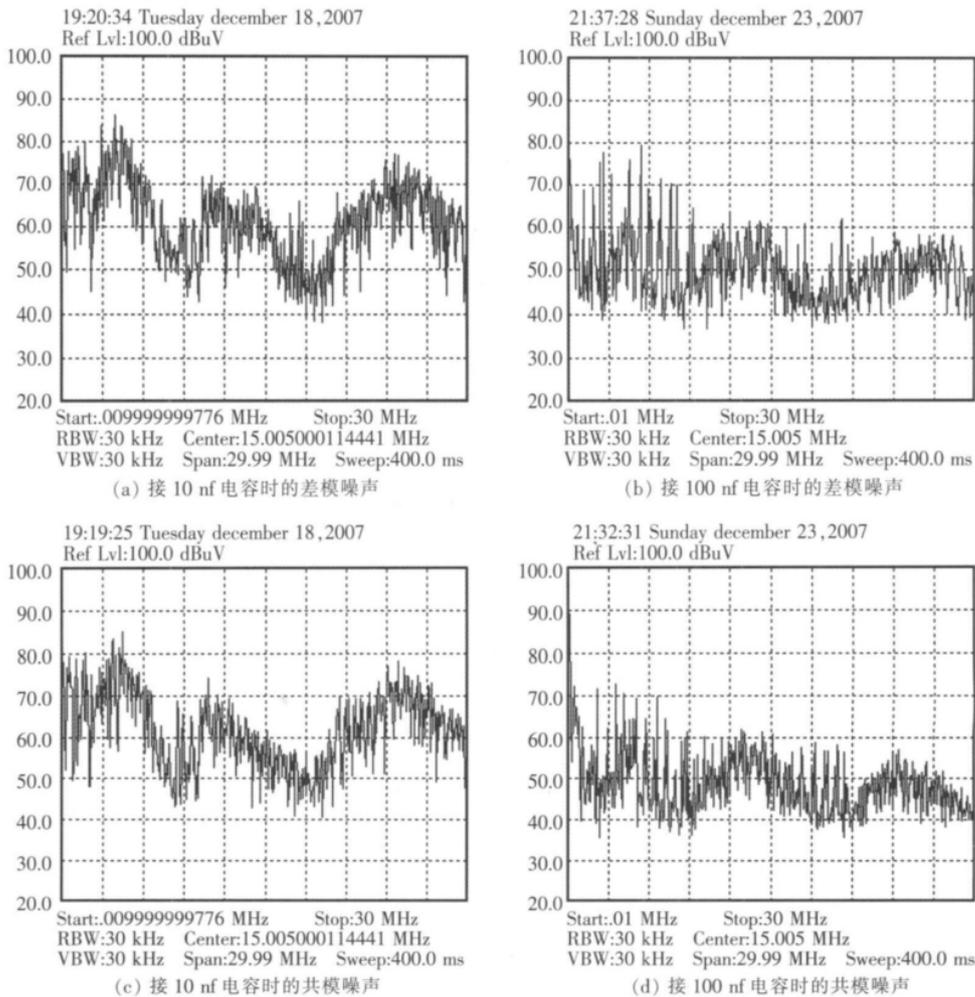


图 7 驱动电路输出端分别接 10 nF 和 100 nF 电容时的噪声波形

Fig.7 Noise waveform while drive circuit output port connect to capacitance respectively with 10 nF and 100 nF

通过上述分析可见,随着上升时间增加,共模干扰噪声和差模干扰噪声都将减小. 因此,可以在驱动电路的输出端接入不同大小的电容,从而改变 u_{gs} 的上升沿时间.

图6给出了驱动电路输出端分别接10 nf和100 nf电容时的 u_{gs} 波形,图7给出了不同上升沿时间的噪声实验结果.由图7的实验结果同样可得结论,随着上升时间增加,共模干扰噪声和差模干扰噪声都将减小.

4 结论

本文对近年来开关电源传导性电磁干扰机理研究的内容及方向进行了阐述,提出了本文拟解决的问题.通过对电路的分析,提出了一种新的基于驱动噪声的开关电源电磁干扰分析模型.由此模型可分析驱动电路波形对开关电源噪声的影响,并进行了试验验证.本文提出的开关电源电磁干扰分析模型未考虑线路及电器元件的高频寄生参数,如若考虑了线路及电器元件的高频寄生参数则该模型将能更加精确的接近电路实际噪声耦合通道.

[参考文献](References)

- [1] Scheieh R, Roudet J. EMI conducted emission in the differential mode emanating from an SCR: Phenomena and noise level prediction[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2): 105-110.
- [2] Schnaen J L, Roudet P, Saguet S. Power electronics converter modeling using microwave theory and techniques[J]. Electronics Letters, 1996, 32(10): 904-906.
- [3] 吴昕, 钱照明, 庞敏熙, 等. 基于反向技术的开关电源共模干扰的抑制[J]. 电力电子技术, 2000, 34(2): 26-27.
Wu Xing, Qian Zhaoming, Pang Mingxi. A method for suppressing common mode noise of switching power supply based on anti-phase technique[J]. Power Electrical Technology, 2000, 34(2): 26-27. (in Chinese)
- [4] 袁义生. 功率变换器电磁干扰的建模[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2002: 78-106.
Yuan Yisheng. Electromagnetic interference modeling for power converters[D]. Hangzhou: College of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2002: 78-106. (in Chinese)
- [5] 和军平, 陈为, 姜建国. 开关电源共模传导干扰模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 50-55.
He Junping, Chen Wei, Jiang Jianguo. Model and analysis of common mode conducted EMI of a switched mode power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 50-55. (in Chinese)
- [6] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. 开关电源变换器传导干扰分析及建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 49-54.
Meng Jin, Ma Weiming, Zhang Lei, et al. Method for analysis and modeling of conducted EMI in switching power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 49-54. (in Chinese)
- [7] Nagel A, R W De Doncker. Analytical Approximations of Interference Spectra Generated by Power Converters[C]// IEEE Industry Applications Conference. New Orleans, Louisiana: 1997.
- [8] 赵阳, 姜宁秋, 孙焱. 传导电磁干扰噪声分离方法研究与新进展[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(1): 1-7.
Zhao Yang, Jiang Ningqiu, Sun Yan. Research and development of conductive EMI separating techniques[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2009, 9(1): 1-7. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]