设计与研究

开关电源传导EMI的模型分析与应用

林思聪　陈为
福州大学电气工程及自动化学院 (350002)

摘　要　从分布电容的角度出发，分析变压器及散热片产生EMI的方式及其特征，建立了开关电源共模传导发射的分析模型，并据此提出了降低反激式开关电源EMI共模发射源水平的解决方案及设计方法，通过实验验证了各设计方法的有效性。

关键词　变压器　开关电源　电磁干扰
中图分类号：TM401+.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-3175-(2005)01-007-03

Modeling and Application of Conducted EMI in Switch Mode Power Supply

LIN Si-cong　CHEN Wei
College of Electrical Engineering & Automation, Fuzhou University (350002)

Abstract: Based on the stray capacitances of transformer and heat-sink, analysis on the means and the features on generation of EMI by transformer and heat-sink is made, and analytical model of common mode conducted EMI emission in switch mode power supply is built; and based on this some solutions and design methods are proposed to reduce the level of common mode conducted EMI emission source in revers-stimulation type switch mode power supply, the effectiveness of each design method is verified by experiment.

Key words: transformer; switch-mode power supply; EMI(electromagnetic interference)

0　前言

开关电源中快速通断的功率半导体器件会形成具有陡峭上升沿和下降沿的电压、电流波形，这些电压和电流的高频分量通过变压器和功率器件的分布参数及引线、PCB走线等的杂散参数的耦合传播，对公用电网造成严重的电磁干扰。干扰途径包括辐射发射和传导发射两种。抑制EMI主要是从减小干扰源和阻断干扰源传播信道上着手的。在抗EMI信号的辐射危害方面，屏蔽是一种比较有效的方法；而对付传导发射，一方面可以采用在传导干扰传播信道上加上EMI滤波器来阻断和衰减开关电源的EMI干扰。另一方面更重要的是要想办法从源头上降低开关电源的干扰源水平(即不加滤波器时的干扰水平)，例如通过减缓功率开关管的门极驱动脉冲上升速度，但这会带来效率的下降。

传导发射包括差模和共模两种，差模主要取决于输入电流的纹波，比较容易分析和抑制；而共模是由功率变换器电路中各个节点对地的分布电容，特别是电压变化大的节点对地的分布电容引起的，它的传输模型和参数比较复杂。该文从分布电容的角度出发，分析变压器及散热片产生EMI的方式及其特征，建立共模传导发射的分析模型，并据此提出降低开关电源电磁干扰的设计方法，并通过实验验证了各设计方法的有效性(所有实验结果是在样机不加任何EMI滤波器的情况下测得)。

1　开关电源电磁干扰的机理分析及模型

以一台反激式单路输出开关电源作为分析及实验样机，其电源设计参数为：

输入交流：50Hz，85～220V

输出直流：19V/3A

开关频率：65kHz

变压器设计参数：

磁心：EE33/3C96

原副边匝比：$N_P:N_S=38:9$

原边绕组：单根Φ0.64mm线绕两层

副边绕组：5根Φ0.45mm并绕两层

图1所示为功率变压器绕组原副边间没有屏蔽时反激式开关电源共模传导干扰发射测量的原理图。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

虚线连接的电容C_{p0}表示功率管漏极与散热器间的耦合电容；C_o表示负载端对大地的耦合电容；C_{ps}表示变压器原边绕组连到原边电位变化点(即开关管的D极)那一端对副边的耦合电容；C_{sp}表示变压器副边绕组连到副边电位变化点(即二极管的正极)那一端对原边的耦合电容。图中虚线框内的LISN是实验中用来测量干扰源大小的电路，其参数是采用CISPR22标准规定的参数。由于功率开关管的漏极产生很大的跳变电压，所以被认为是主要的干扰源[1]；同理，变压器副边的整流二极管两端也存在电压跳变，也可认为是一个干扰源，输出电压越高，其作用就越明显。原、副边干扰源的极性如图1所示，其极性刚好相反。图1中用黑粗线表示了共模传导干扰传输信道，可见原边干扰源通过散热片分布电容C_{po}和变压器的分布电容C_{ps}形成共模噪声回路，副边干扰源通过C_{sp}和C_o形成共模噪声回路。对于原副边没有屏蔽的变压器，C_{ps}很大(高达几百pF)，大大于C_o，因此C_{ps}可忽略。由此得到其共模传导发射模型如图2所示。

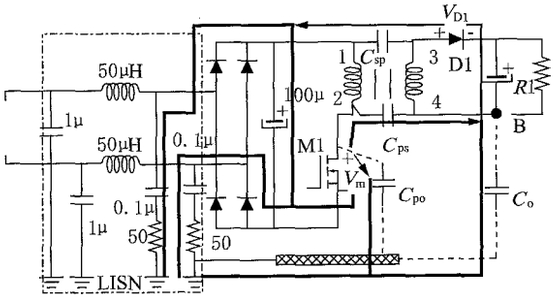


图 1 考虑了副边干扰源的共模传导发射测量原理图

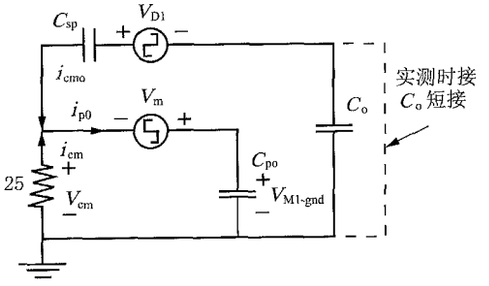


图 2 考虑了副边影响时的共模传导发射等效模型

流过LISN阻抗的共模噪声总电流为：

$$i_{cm}=i_{po}-i_{cmo}=C_{po}\frac{dV_{M1\text{-}gnd}}{dt}-(C_o//C_{sp})\frac{dV_{D1}}{dt} \quad (1)$$

由式(1)可知，减小i_{po}或增大i_{cmo}都可以减小共模噪声总电流，从而减小传导发射。

2 减小开关电源电磁干扰的设计方法

2.1 散热片接输入直流电源负极

在实际电路参数中，$V_{M1\text{-}gnd}$大大于$V_{D1\text{-}gnd}$，则在共模噪声电流i_{cm}中，由$V_{M1\text{-}gnd}$产生的i_{po}起主导作用。减小i_{po}就可以减小传导发射的水平。如图3所示，若将散热器接到输入直流电源负极，即分布电容C_{po}被接到了输入直流电源负极。共模电流i_{po}通过功率开关管、C_{po}、散热器构成回路，从而不对电网构成干扰。

图4为上述样机在散热器接输入直流电源负极与散热片接大地时的传导发射测量比较图，由图可见，散热器接输入直流电源负极后，传导发射水平整体比接大地好，最大可降低14dBμV左右。

需注意的事，为了安规要求，散热器可串接一个103的电容再接到电源负极。

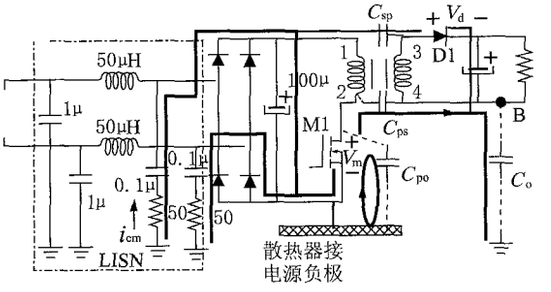


图 3 散热器接电源负极的共模传导发射测量图

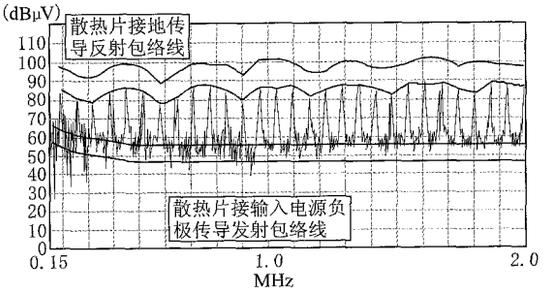


图 4 散热器不同接法的传导发射测量结果

2.2 变压器的设计

图3所示电路把功率开关管漏极与散热器间的分布电容C_{po}输入直流电源负极后，变压器分布电容C_{ps}对共模噪声的作用就变的很重要了。图5为图3电路所对应的共模传导发射模型。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

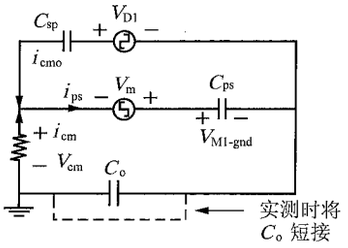


图 5　散热器接电源负极的共模传导发射等效模型

由模型可见，原、副边干扰源极性相反，可起到相互补偿作用。通过减小 C_{ps} 或增大 C_{sp}，可减小 i_{cm}，从而降低共模传导发射水平。

变压器绕组端点在绕组中的合理位置及原副边绕组之间加适当的法拉第屏蔽可调整 C_{ps} 和 C_{sp} 的大小，下面分别分析其机理并验证其对传导EMI的影响。

1)变压器绕组端点的设计

C_{ps} 表示变压器原边绕组连到开关管的漏极那一端(图3中变压器绕组端点2)对副边的耦合等效电容。原副边绕组偶合电容的大小不仅与绕组导线的布置有关，而且与沿绕组导线的电位分布有关，或者说与绕组端点的放置位置有关，因此改变连接端点可以改变原副边绕组偶合电容的大小。如图6所示，将原边端点2埋在最底层，即远离变压器副边绕组，由于外层绕线将来自该层的电场屏蔽，减小了端点2与副边绕组的电场耦合，从而减小了 C_{ps}；同理，将副边电压变化端点3放置在靠近原边绕组的一层，可增大 C_{sp}。

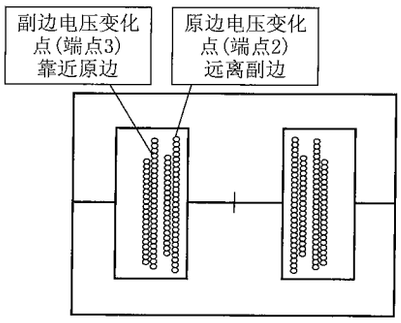


图 6　绕组端点放置示意图

为验证上述分析的有效性，实验中分别测量了变压器原边绕组电压变化点(端点2)靠近副边和远离副边两种情况下的传导发射，副边电压变化点(端点)都靠近原边。测量结果如图7所示。从图中可知，把端点2放置在远离副边绕组的一层，其传导发射比把端点2放置靠近副边绕组的一层改善了许多，最大可降低近 20dBμV。

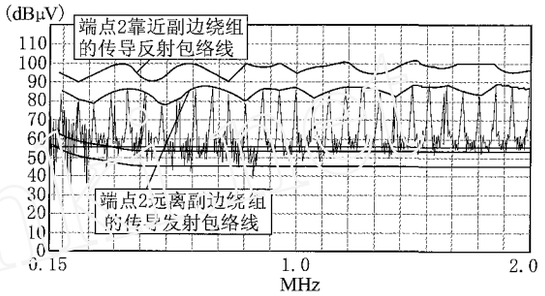


图 7　电压变化点不同放置的传导反射测量结果

2)绕组屏蔽的设计

从共模噪声传输途径的角度分析了屏蔽对开关电源EMI的影响[2]，认为使用屏蔽可以有效的减小EMI的共模噪声。但文章没有就如何合理的设计屏蔽宽度进行分析。

由图5模型及以上分析可知，合理的调整分布参数 C_{ps} 和 C_{sp}，可最大限度的降低共模传导电流。通过功率变压器原副边绕组间的屏蔽可以调整 C_{ps} 和 C_{sp} 的大小参数。图8为变压器绕组加原边屏蔽(即指屏蔽铜片接到原边的电位固定的正端或负端)时，分布电容的高频集参模型。

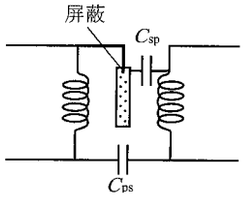


图 8　变压器绕组有屏蔽时的分布电容模型

其中 C_{ps} 是变压器加原边屏蔽后对副边的残余等效分布电容。当有屏蔽时，C_{ps} 大大降低，使得原边干扰源的作用大大降低，这时副边干扰源通过 C_{sp}(副边电压跳变点，即高频整流二极管D1正极与屏蔽层之间的分布电容)引起的共模噪声补偿作用相对会增强。通过调整屏蔽铜片的宽度，会改变 C_{ps} 和 C_{sp}，从而改变原副边干扰源通过 C_{ps} 和 C_{ss} 产生的共模传导电流的大小及其抵消补偿效果，从而改变共模噪声发射水平。

图9为屏蔽铜片宽度分别为16mm(全屏蔽)和9mm时的传导发射测量结果。

(下转第30页)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2)用电计量功能 在用电过程中系统对用户分路累加计量(显示已用电量)和预购电量递减计量(显示剩余电量),并通过管理员终端直观显示。

3)分时段控制电路通断功能 学院采用双路负载控制,根据学校作息时间,分别设定房间照明、插座用电时间。

4)退费管理功能 当集体调换房间时,只须将该单元的剩余电量进行转换即可。

学院学生公寓双路负载控制,一路为20A,分别控制电热水器、空调、地灯和床边微风吊扇插座,可以不受时间控制;另一路10A,分别控制照明、电脑、电视插座,定时关电。施工阶段,建筑工人误将电锤、切割机等大功率用电器接入小容量插座回路,烧坏许多计量模块。今后要注意,施工阶段只从楼层计量表箱接通大容量回路,室内终端箱两回路并接,既保证施工用电,又能使每个房间电气调试。等施工结束再恢复两回路单独控制。

3#10kV变电所为内附式,设计在信息楼西侧汽车工程楼内,主要供电给信息楼、行政楼及汽车工程楼。由于汽车工程楼为三期建设项目,3#10kV变电所暂时未建造,只能从2#变电所临时供电,线路较远,超过了供电局规定的可靠供电半径。而信息、行政楼均有中央空调,用电量大,线路上损耗大,电能浪费多。二、三期工程完工后,输出回路不够用,3#变电所必须尽快筹建。

为了保护配电线路的选择性保护,大楼配电房的每路出线开关和终端箱末端空气开关之间,设计了隔离开关作为终端箱的总开关。

(收稿日期:2004-04-20)

(上接第9页)

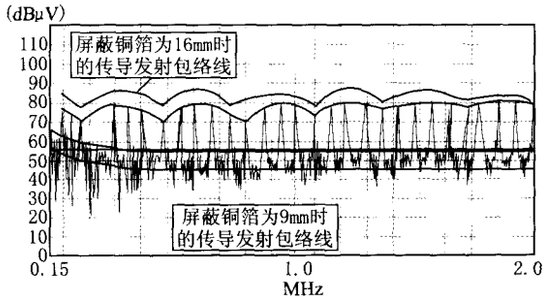


图9 不同屏蔽宽度的传导发射测试结果

图中屏蔽为9mm的传导发射整体水平比全屏蔽时下降了许多,最大可达到10dBμV。可见,屏蔽铜片的设计并不是越完全越好,而是有一个优化的屏蔽宽度。即调整屏蔽宽度以使得相位相反的原边和副边两个干扰源的作用效果可以补偿抵消。值得注意的一点是,应该采用薄的铜片作为屏蔽,以免由于涡流而产生附加损耗。屏蔽铜片一般连接到电路的等电位点,如输入直流电源的正极或负极。连线应尽量短,其一端要焊接到铜片中心附近。

3 结论

基于散热器和变压器的分布电容,通过建模分析和实验验证,提出了降低反激式开关电源EMI共模发射源水平的解决方案及设计方法。得到如下结论:

1)将散热器接输入直流电源负极比把散热器接大地具有更好的EMI效果,这使得共模电流不必通过大地形成回路。

2)变压器原边绕组连接功率管漏极的那一端(电压跳变端点),在绕制变压器时,应放置在最底层(即远离副边绕组),从而减小原副边绕组间的等效偶合电容。

3)变压器原副边绕组间的铜箔电场屏蔽不是屏蔽得越完全越好,屏蔽铜片的宽度有一个优化的宽度,以使得相位相反的原边和副边两个干扰源的作用效果可以补偿抵消。

参考文献

〔1〕 Wei Zhang, Zhang Micheal T, Lee Fred et al. Conducted EMI Analysis of A Boost PFC Circuit. APEC Record, Applied Power Electronic Conference and Exposition, 1997.223~229

〔2〕 冯江涛,杨志辉,陈为,等.变压器屏蔽对开关电源电磁干扰(EMI)影响的分析.台达电力电子研发中心2002年会论文集,2002

(收稿日期:2004-10-14)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net