

# 降低电机逆变系统电磁污染的软开关技术研究

杨迎化<sup>1,2</sup>, 谢顺依<sup>1</sup>, 高洪林<sup>2</sup>, 王新华<sup>2</sup>, 陈晔<sup>3</sup>

- (1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033;
- 2. 海军潜艇学院 导弹兵器系, 山东 青岛 266071;
- 3. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

**摘要:**分析了传统的硬开关 PWM 逆变传动系统中传导电磁干扰的产生源和传播路径。为了减少传导电磁干扰,应用一种新型的直流环节并联谐振软开关逆变器,阐述了软开关逆变器的工作原理及其特点。采用线阻抗稳定网络,分别在硬开关和软开关的条件下,对一台 60 kW 的 IGBT 交流逆变系统的 EMI 传导噪声进行了测量,并对硬开关和软开关逆变器的 EMI 噪声频谱进行了对比。

**关键词:** PWM 逆变器;电磁干扰;软开关;线阻抗稳定网络

**中图分类号:** TM464

**文献标识码:** A

## Study on Soft-switching Technology to Reduce the Electromagnetic Pollution of Motor Inverter System

YANG Ying-hua<sup>1,2</sup>, XIE Shun-yi<sup>1</sup>, GAO Hong-lin<sup>2</sup>, WANG Xin-hua<sup>2</sup>, CHEN Ye<sup>3</sup>

- (1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China; 2. Department of Missile and Weaponry Engineering, Naval Submarine College, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Qingdao branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, Shandong, China)

**Abstract:** The source and path of conducted electromagnetic interference (EMI) in the traditional hard-switching PWM inverter drive system was analyzed. To reduce the conducted EMI, a novel parallel resonant DC link inverter (PRDCLI) was applied, and its work principle and characteristics was expounded. Using line impedance stabilization network (LISN), the EMI conducted noise of a 60 kW IGBT-based inverter system was measured under conditions of hard-switching and soft-switching respectively, and compared the EMI conducted noise spectral between hard-switching inverter and soft-switching inverter.

**Key words:** PWM inverter; electromagnetic interference (EMI); soft switching; line impedance stabilization network (LISN)

电力电子系统中的电磁兼容问题具有它本身的特殊性,通常,它涉及到装置主电路中的大功率器件开关过程中过高的  $dv/dt$  和  $di/dt$  引起的强大的传导型电磁干扰<sup>[1,2]</sup>,有些高频大功率装置还会引起很强的电磁场(特别是近场)辐射,它们不但可能造成自身控制电路的误动作,而且会对系统内部的其它装置造成电磁干扰,影响其正常工作。变频器产生的传导 EMI 是以电压或电流的共模与差模形式出现的,它分为共模 EMI 噪声和差模 EMI 噪声。

对于变频器,多数情况下产生的传导干扰是以共模 EMI 为主,并且共模电流流经大地构成回路,大地将形成天线效应,给其他设备带来严重的 EMI,这使得共模 EMI 造成的危害远远大于差模 EMI 所造成的危害。因此共模 EMI 在变频器的电磁兼容性设计中显得尤为重要,而这种共模电流即为系统的漏电流<sup>[3~5]</sup>。

### 1 EMI 的传播途径

在电机驱动系统中,由于采用 PWM 调制技

基金项目:国防“十一五”重点攻关项目

作者简介:杨迎化(1979—),男,博士,Email:flymarsyang@sina.com

术,线路中的电压、电流随功率开关器件动作产生很高的  $dv/dt$ ,  $di/dt$ , 电压、电流的谐波成分从几 kHz 到几百 MHz 甚至上 GHz, 这些高频成分通过寄生电容和公共阻抗形成漏电流, 产生传导 EMI。电机驱动系统漏电流的传播主要通过两条途径: 一条是电力电子器件与散热器之间的寄生电容耦合; 另一条是电机的绕组和定子机壳之间的分布电容耦合。如果变频器输出电缆很长, 还要考虑通过电缆和地之间的分布电容的耦合。漏电流的返回路径主要是系统变压器的中性点接地线。电机传动系统共模 EMI 的传播途径如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

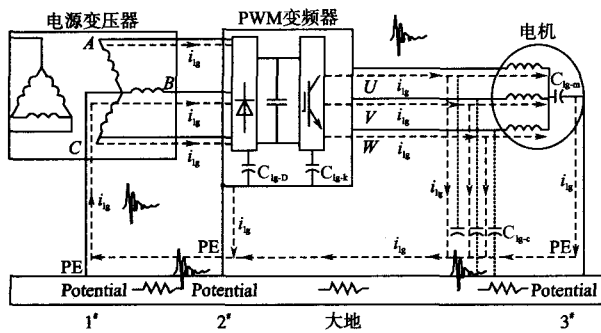


图 1 电机传动系统共模 EMI 的传播途径  
Fig. 1 Spread approach of common mode EMI in motor drive system

图 1 中,  $C_{ig-m}$  为电机的绕组和定子机壳之间的分布电容;  $C_{ig-c}$  为电缆和地之间的分布电容;  $C_{ig-D}$  和  $C_{ig-k}$  为电力电子器件的金属管壳与散热器之间的寄生电容;  $i_{ig}$  为漏电流。

既然软开关技术可以抑制过高的  $dv/dt$  和  $di/dt$ , 因而, 普遍认为, 软开关也能减少硬开关 PWM 逆变器产生的 EMI 噪声。然而, 软开关是否能改善 EMI, 这个机制如何运行, 仍然没有得到深入的研究, 本文将对这一问题进行研究。

## 2 逆变器原型和 EMI 测试

### 2.1 新型的直流环节并联谐振软开关拓扑

本文采用一种新型的直流环节并联谐振软开关逆变器 (PRDCLI), 其拓扑结构如图 2 所示。系统电路由一个主开关、一个辅助电路和逆变器电路及交流电机组成。主开关由开关管  $T_1$  和与其反向并联的二极管  $D_1$  组成。辅助电路由辅助开关管  $T_2$ 、二极管  $D_2$ 、谐振电感  $L_{r1}$  和  $L_{r2}$  (其值均为  $L_r$ ), 以及谐振电容  $C_r$  组成。辅助开关管  $T_2$  功率等级比较低, 并且比主开关管  $T_1$  速度快。

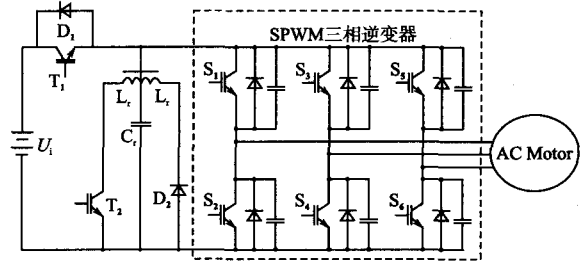


图 2 新型 PRDCLI 的拓扑结构  
Fig. 2 Topology of novel PRDCLI

在逆变器运行过程中, 在主开关开通前, 相应的辅助开关先开通, 谐振电感充电到一定的而且足够的电流值。然后, 谐振电感和谐振电容之间的谐振开始, 并使主开关两端的电压谐振降到零, 从而获得零电压的条件, 主开关可以在零电压条件下开通, 并且可以减轻主开关的反并联二极管的反向恢复问题。当主开关器件关断时, 并联的电容可以降低其两端电压的上升率。

新型的 PRDCLI 电路不仅具有前人已经提出的各种类似电路的特点, 同时还克服了这些电路所存在的很多缺点。可归纳如下。

- 1) 电路中的所有开关管都是在软开关的条件下进行开关的。开关管  $T_1$  在零电压的条件下开通和关断。开关管  $T_2$  在零电流的条件下开通并且在零电压的条件下关断。
- 2) 电路中辅助开关管和逆变器主电路的开关管均未负担额外的电压应力和电流应力。
- 3) 新型的 PRDCLI 电路可以根据逆变器的 PWM 调制和软开关操作的要求, 在任何时刻使直流侧电压过零, 并持续所需的时间段。

图 3 示出了输入逆变器直流侧电压, 从图 3 中可以看出, 电压从  $U_i$  下降到零, 并保持零值一段时间, 而后又重新上升到  $U_i$ 。电压的下降和上升通过  $L_r$  和  $C_r$  之间的谐振来获得, 所以, 本电路能不依赖于电流而工作在较高的频率。而且, 电压零值的持续时间可以根据软开关的要求选择, 并可以根据逆变器 PWM 调制的要求在任何时刻发生。

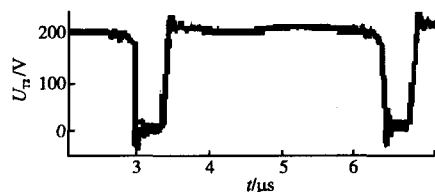


图 3 软开关逆变器直流侧电压曲线  
Fig. 3 Input DC voltage of soft switching inverter

### 2.2 EMI测试系统设置

电机 PWM 逆变传动系统的 EMI 测试系统框图见图 4,直流电源两端分别接有一个线阻抗稳定网络 (line impedance stabilization network, LISN), LISN 输出信号给频谱分析仪。每一个 LISN 的阻抗为 50Ω, LISN 的简化电路图见图 5<sup>[7]</sup>。

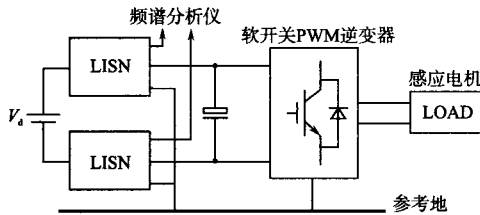


图 4 EMI 测试系统框图

Fig. 4 EMI measuring system

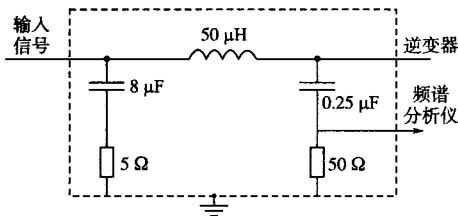


图 5 LISN 简化电路图

Fig. 5 LISN equivalent circuit

通过频谱分析仪观察 LISN 两端的电压,我们可以测得传导 EMI。假设  $V_1, V_2$  分别为两个 LISN 中 50Ω 电阻两端的电压,差分噪声定义为这两个电压的差值,即:

$$V_{dm} = (V_1 - V_2) / 2 \quad (1)$$

共模噪声定义为这两个电压的平均值,即

$$V_{dm} = (V_1 + V_2) / 2 \quad (2)$$

为简单起见,通过测量直流输入线上的共模噪声电流的总量  $I_{cm}$ ,可测得共模噪声。公式如下:

$$V_{cm} = 25I_{cm} \quad (3)$$

### 3 实验与结论

本文分别在硬开关和软开关的条件下,对一台 60kW 的 IGBT 交流逆变系统的 EMI 噪声进行了测量。其中主开关器件和辅助开关器件均采用三菱公司的 IGBT 模块 CM600HA。图 6 为硬开关逆变器 EMI 噪声频谱。图 7 为软开关逆变器 EMI 噪声频谱。

对比图 6 和图 7 的开关结果,可以看出,在 3~30 MHz 的大部分频率范围内,软开关逆变器产生的传导 EMI 噪声比硬开关逆变器产生的传导

EMI 噪声减小了很多。这是因为,在软开关逆变器中,当主开关器件关断时,缓冲电容减慢了其两端电压的上升速率  $dv/dt$ ,所以减少了流过主开关器件寄生电容的共模电流。而且,谐振环的辅助开关器件  $T_1$  和  $T_2$  也是在软开关的条件下进行开关的。开关管  $T_1$  在零电压(ZVS)的条件下开通和关断。开关管  $T_2$  在零电流(ZCS)的条件下开通并且在零电压(ZVS)的条件下关断。

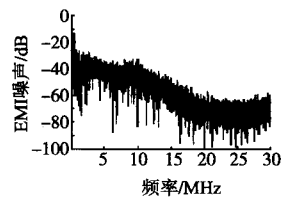


图 6 硬开关逆变器 EMI 噪声频谱

Fig. 6 EMI noise spectrum of hard switching inverter

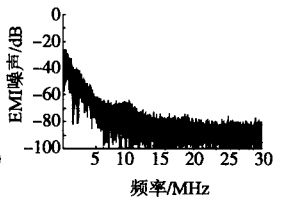


图 7 软开关逆变器 EMI 噪声频谱

Fig. 7 EMI noise spectrum of soft switching inverter

本文通过对硬开关和软开关逆变器的 EMI 噪声频谱的对比,证明了软开关逆变器能够大幅降低传统硬开关逆变器产生的传导噪声,从而能够降低逆变器对其它设备的电磁干扰,能够较好地保证系统安全正常的运行。

#### 参考文献

- [1] 范子超,千金,于庆广,等. ARCPI 及其在多电平逆变器中的应用[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 58-63.
- [2] Shukla J, Fernandes B G. Quasi-resonant DC-link Soft-switching PWM Inverter with Active Feedback Clamp Circuit for Motor Drive Application[J]. IEE Proc. -Electr. Power Appl., 2006, 153(1): 75-82.
- [3] 刘小虎,谢顺依,郑力捷. 电动车用感应电机最大效率控制技术[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(6): 829-831.
- [4] 幸善成,吴正国,吴言凤. 逆变器驱动电机系统中共模耦合电流的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(4): 579-582.
- [5] 陈斌,姜建国,孙旭东. PWM 逆变器—感应电机驱动系统中接地电流 EMI 问题的分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 58-62.
- [6] 姜保军,孙力,孙亚秀,等. 电机驱动系统传导 emi 的抑制方法[J]. 电气传动, 2006, 36(5): 9-12, 28.
- [7] Pei Xuejun, Zhang Kai, Kang Yong, et al. Analytical Estimation of Common Mode Conducted EMI in PWM Inverter [C]// IAS, 2004: 2651-2656.