

变频器电磁干扰（EMI）及其控制

上海埃德电磁技术有限公司 柳光福

1 前言

与传统的电力拖动、电机驱动方法相比，变频技术具有节能、减小供电设备的体积重量的长处。随着电子技术日新月异的发展，性能优异的大功率器件的新发展，新的控制方法的涌现，使得变频技术在很多传统领域得到较为普遍的应用。

与此同时，变频技术正在家用电器行业掀起革新的浪潮。各式各样的变频空调、变频冰箱、变频洗衣机、变频微波炉、变频电磁灶等等，都在争先恐后地进入市场。这是技术进步的结果。反过来，又促进了变频技术的深入发展。

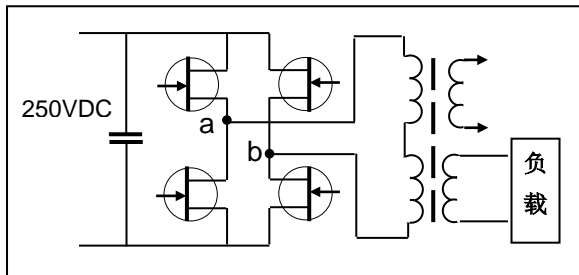


图1 变频器原理框图

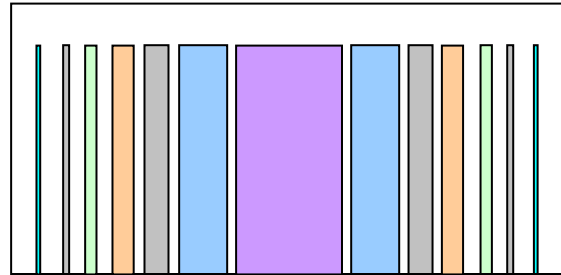


图2 a-b间的方波

大家知道，变频技术的一个重要特点，就是其采用的功率器件（如：GTR、GTO 和 MOSFET 等）是在开关状态下工作。如图1所示PWM控制的变频电路，在其a与b点之间的电压波形如图2所示，是一系列宽度不等的方波。由于种种原因，方波的前后沿总是有一定的上升和下降时间。为方便分析，假定上升和下降时间相等，方形为等腰梯形，如图3右上角所示。

按照福里衰级数的分析方法，可以算出其各次谐波的幅度为：

$$V_n = 2V \frac{\tau}{T} \left(\frac{\sin \frac{n\pi \tau_r}{T}}{\frac{n\pi \tau_r}{T}} \right) \left(\frac{\sin \frac{n\pi \tau}{T}}{\frac{n\pi \tau}{T}} \right) \quad (1)$$

式中： $V_n = n$ 次谐波的幅值，V；
 $V =$ 方波的幅值，V；
 $\tau_r =$ 上升和下降的时间，s；
 $\tau =$ 方波宽度，s；
 $T =$ 周期，s。

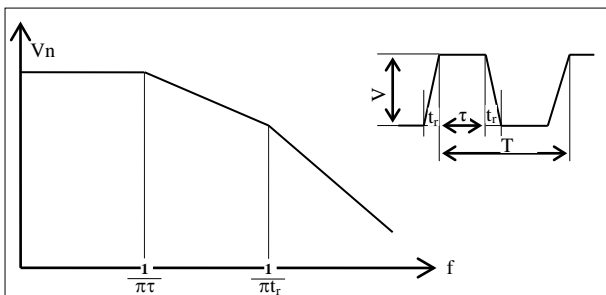


图3 方波及其谐波包络

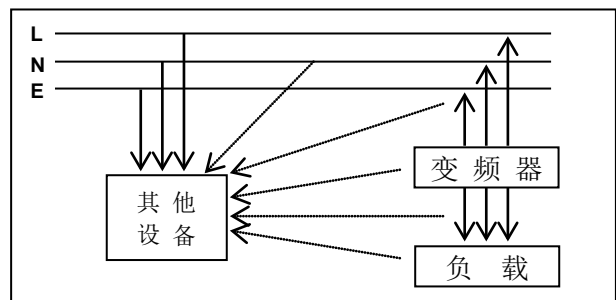


图4 EMI路径示意图

在一定的重复频率下，其各次谐波幅度的包络如图 3 所示。由于图 2 所示的方波宽度是各不相同的。于是，其生成的谐波幅度包络就更加的复杂了。由于实际应用中的方波幅度很高，有的甚至高达几千伏，这样一来，由（1）式估算出的高次谐波直到移动通讯的频率范围（900MHz 和 1800MHz）仍然是十分可观。从电磁兼容性（EMC）的观点来分析，它就是一个必须加以控制的强烈干扰源。

2 电磁干扰（EMI）路径分析

为了能有效控制变频器正常运行时产生的 EMI 信号。首先要分析其 EMI 信号的传播路径。

图 4 为有变频器的单相电网框图。图中变频器产生的 EMI 会沿导线和空间辐射的路径传播，这就是我们所说的传导干扰和辐射干扰，由此对同一电网上邻近电子设备的正常运行构成威胁。图 4 中用实线箭头的线表示 EMI 信号沿导线传播的路径，以虚线箭头的线表示 EMI 信号经空间传播路径。无论 EMI 信号沿导线还是经空间的路径传播，又可分为差模（DM）EMI 信号和共模（CM）EMI 信号。其中，差模是指在相线（L）和中线（N）之间的 EMI 信号，见图 5；共模是指在相线（L）与地线（E）之间和中线（N）和地线（E）间的 EMI 信号，见图 6。

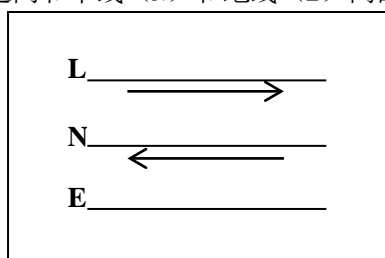


图 5 EMI 信号中的差模(DM)分

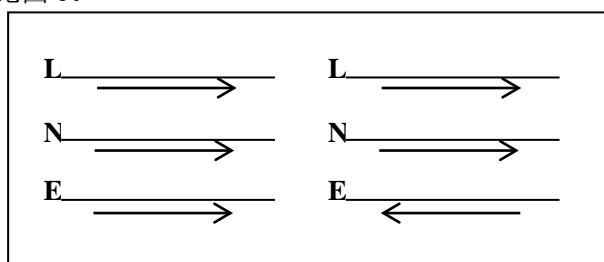


图 6 EMI 信号中的共模(CM)

关于差模 EMI 信号产生的辐射是由差模电流流经导体形成环路而生成，可用图 7 所示的等效环形天线的模型来表示。在远场范围内的 r 点处生成的最大场强为：

$$E=131.6 \times 10^{-16} [f^2 AI] [1/r] \quad (2)$$

E =在远场范围内 r 点处的场强，V/m；

f =差模 EMI 信号的频率，Hz；

A =差模信号等效环路面积， m^2 ；

I =差模信号电流，A；

r =到等效环路中心的距离，m。

只要等效环路周长小于所计算的差模 EMI 信号的四分之一波长，由（2）式估算出的结果是相当准确的。

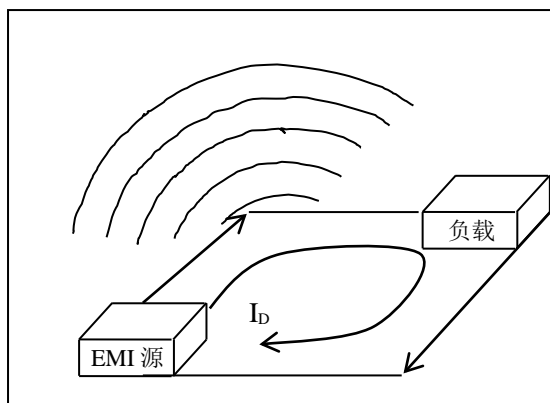


图 7 EMI 差模信号的空间传播

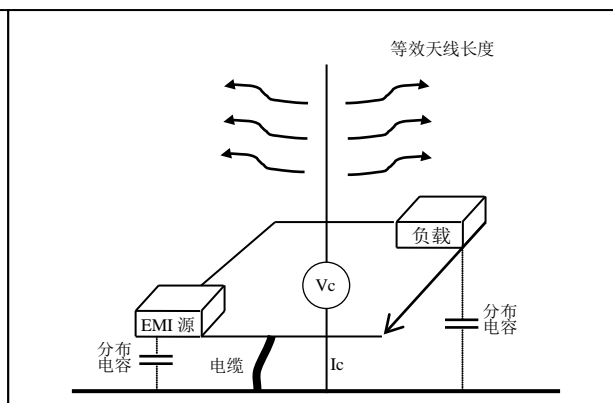


图 8 EMI 共模信号的空间传播

另一方面，由于电流流过时，会在导体上面产生电压降。当用电线把有关地线和设备（或系统）的“地”连接起来后，某些部位的电位会比设备（或系统）的“地”电位高，这就是共模电位。在一定的条件下，这个电位所生成的电流会以电场辐射的方式向外辐射电磁干扰能量，我们可用图 8

所示的等效单极天线的模型来说明，在远场范围内 r 点处生成的最大场强为：

$$E=4\pi\times 10^{-7}[fIL][1/r]$$

式中：E=在远场范围内 r 点处的场强，V/m；

f=共模 EMI 信号的频率，Hz；

I=接地电缆中的共模电流，A；

L=等效单极天线的长度，m。

只要等效单极天线的长度小于所估算的干扰信号的四分之一波长，由（3）式估算出的最大场强 E 是相当准确的。

大家都知道，EMI 要污染环境，也可能对系统内和系统之间的其他电子设备的正常运行造成危害。那么，如何把 EMI 控制到一定的电平才能保护环境、确保系统内和系统之间的其他电子设备的正常运行呢？这个问题一直在引起人们的关注。为了控制 EMI，世界各国都制定有相应的标准，即电磁兼容性标准。这些标准中规定的 EMI 电平极限值，是根据电波传播理论和实际测得的数据，结合当时科技发展的水平来规定的。例如美国的 FCC 标准，欧共体的 CE 标准，我国也有相应的电磁兼容性标准。这些标准就是控制 EMI 的法律。如欧共体规定，从 1997 年 1 月 1 日起，所有进入欧共体的电子、电器产品必须符合 CE 规定的要求，否则，不允许销售，对违规销售处以重罚。图 9 即为 CE 信息技术设备标准规定的传导干扰极限值，图 10 是 CE 信息技术设备标准规定的辐射干扰的极限值。当然，标准也规定了严格的测量方法。要满足标准规定的 EMI 极限值，就必须采取控制 EMI 的相应措施和设计方法。

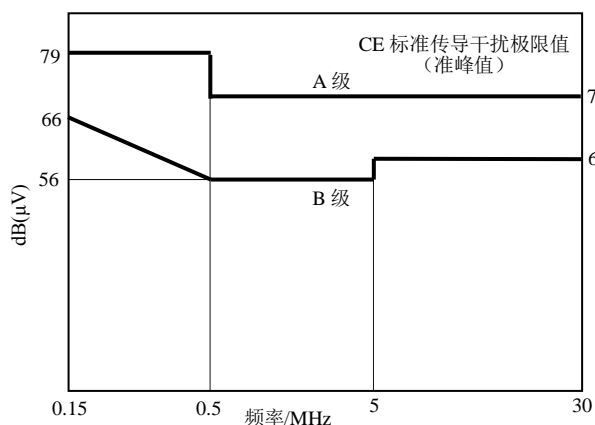


图 9 CE 标准传导干扰极限值（准峰值）

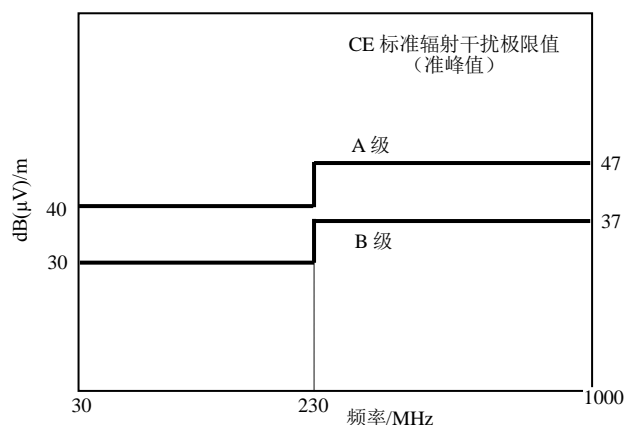


图 10 CE 标准辐射干扰极限值（准峰值）

很多电磁兼容性能标准规定传导干扰为 30MHz 以下的频率范围，辐射干扰为 30~1000MHz 的频率范围。

一方面，我们知道了干扰源的特性和相关的估计方法。另一方面，按照实际情况能分析综合出有关的电路模型。这样一来，便可用计算机算出有关电磁干扰的幅值。科技人员长期的努力已经开发出了很多可供实用的软件，只要输入有关干扰源和电路元件结构的数据，便可显示出干扰信号幅度和场强的分布。有了这些相关的信息，为控制电磁干扰提供了可靠的依据。

3 EMI 的控制与 EMI 滤波器

要使产品满足有关 EMC 标准的要求，必须在产品的开发设计阶段做大量控制 EMI 的工作。首先要选取适当的元件和电路，使之在实现电路功能的同时，能够达到控制 EMI 的目的；其次，要根据电路的特点来设计印刷电路板的走线和元件排布，这方面有很多控制 EMI 行之有效的经验。由很多印刷电路板组成设备，由设备集成为系统的时候，电缆敷设、接地、滤波和屏蔽就成了控制电磁干扰的关键技术。其中，屏蔽（含电缆的屏蔽）是控制 EMI 经由空间传播的有效措施。EMI 滤波器主要是控制 EMI 经导线传播的重要措施。若能把滤波和屏蔽这两项技术有机地结合起来，应用得恰到好处，把 EMI 控制到有关标准规定的极限值以内才有可能实现。到目前为止，还未发现不用 EMI 滤波器的设备或系统能满足有关电磁兼容性标准的例子。合理选用和正确安装 EMI 滤波器后，它除

了能控制沿导线传播的 EMI 信号外，还能有效控制 EMI 信号从电缆产生的辐射传播。

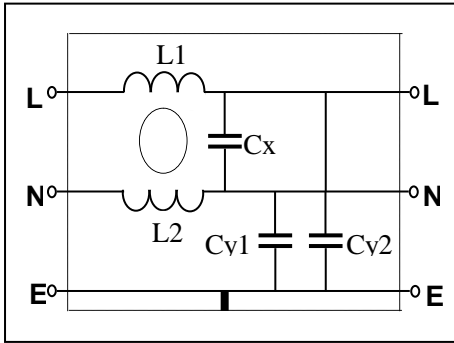


图 11 EMI 滤波器的原理图

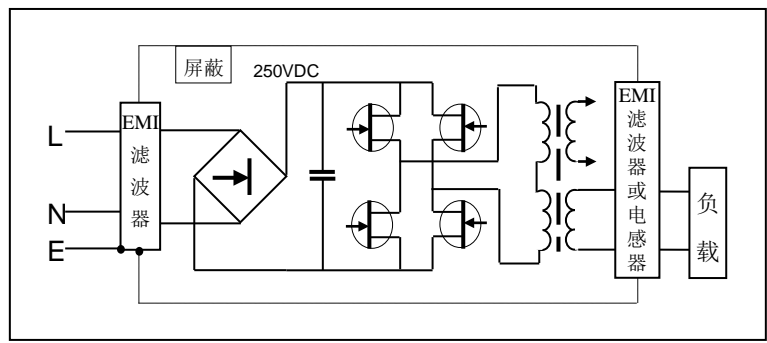


图 12 安装滤波器后的变频器原

图 11 是单相 EMI 滤波器的基本网络结构。它都是由集中参数元件组成的无源网络，虚线框表示滤波器外面的金属屏蔽外壳，它的作用是控制 EMI 信号经空间辐射传播。在图 11 的电路中，只有两只电感 L1 和 L2，三只电容器 Cy1, Cy2 和 Cx。如果把这个 EMI 滤波器插到图 1 所示的变频器的输入电路上，如图 12 所示。这样，L1 和 Cy2、L2 和 Cy1 分别构成 L 与 E 之间和 N 与 E 之间的低通滤波器，用来抑制变频器运行时产生的共模 EMI 信号。其中，L1 和 L2 的电感是绕在磁环上两组线圈，由于多种原因，L1 和 L2 的电感量是不相等的，于是，L1 和 L2 之差便是差模电感，它和 Cx 又组成 L 与 N 之间的一只低通滤波器，用来抑制变频器运行时产生的差模 EMI 信号。从而实现对 EMI 信号的控制。

由于图 11 的电路是无源网络，它具有互易性。当 EMI 滤波器安装在变频器电源入口处后，它既能有效地抑制图 1 所示变频器运行时产生的 EMI 信号传入电网污染电磁环境，去干扰接在同一电网上的其他电子设备，又能大大衰减电网上传播的其他干扰信号对变频器控制电路等的影响。

图 12 中还在变频器的输出端装有 EMI 滤波器或电感器，这也是为了控制 EMI 信号，使之满足有关标准的要求和控制电磁环境污染，保护邻近的电子设设备不会受到有关 EMI 信号的影响。

4 EMI 滤波器的应用

由于诸多原因，目前国内市场上销售的变频器几乎是国外品牌的产品。如牌号为西门子、三菱、富士、通用、伦茨等的变频器。为了控制应用时产生的 EMI 信号，它们也有相应配套的 EMI 滤波器和电感器。但是这些进口的 EMI 滤波器和电感器的售价很贵，差不多为变频器 1/2 到 1/3 的价格，用户看到这样的价格便望而生畏。进口的 EMI 滤波器和电感器价格高昂是也有一定的原因：首先是其额定电流大，小的为几十安培，大的为数百安培，设计制造这种 EMI 滤波器和电感器，有一定的科技含量和难度；其次，据我所知，先进的 SMT 技术无法用来制造 EMI 滤波器和电感器。还须要用熟练工人手工操作来加工零件、组装、灌封等。国外的人工何其贵也，大家是有数的；第三，由于国外不愿投资这种劳动密集型行业，生产商不多，竞争不激烈，价格也“杀”不下来。但是，这门技术早已被我们掌握，上海埃德电磁技术有限公司目前有数十种 EMI 滤波器产品专门与变频器配套，如图 13 的照片是为某调频变速电梯配套的 EMI 滤波器；图 14 是额定值为 440V/50-60Hz 三相 15A, 30A 和 60A 的电感器外型照片。上述这些产品都是按照用户提供的技术参数或样品开发研制的。该公司能提供电流为数千安培的产品。经参数测试和实际使用证明，其产品水平与国外同类产品相当，但是其售价却远远低于国外同类产品的价格。

关于 EMI 滤波器的选用和安装，已有专门文章述及。要控制变频器产生的 EMI 信号，其输入端要装 EMI 滤波器，其输出端也要安装 EMI 滤波器或电感器。因为很多变频器输出的方波频率已不是 50Hz，有的甚至为几十 KHz。由于图 11 所示的 EMI 滤波器电原理图中有 Cx 电容器，其值为 0.15~10 μF 之间。若把这种 EMI 滤波器接在输出为几十 KHz 方波的变频器输出端，等于是把它短路，变频器的烧毁是无疑的。笔者也曾干过这种蠢事。说实在话，我解决过很多设备和系统的电磁干扰问题，但我对变频器的知识却十分贫乏。一次，应邀对某进口变频器造成的 EMI 问题出谋划策。这是



图 13 为某变频调速电梯配套的 EMI 滤波器



图 14 为变频器配套的电感器

关于把变频器用来驱动医疗设备电机造成的 EMI 问题。由于进口的 EMI 滤波器和电感器价钱昂贵，为了降低设备的生产成本，研发商想省下这笔昂贵的开销。在设备调试时发生了问题，其表现之一是软件发生死机，其表现之二是显示器上有网状干扰条纹，有时显示的数据还会发生扭曲。当有关的 EMI 滤波器后，死机问题明显好转，但仍时有发生，却对第二个问题改进甚微。在征得主人的同意后，打算在输出端再安装一只 EMI 滤波器来控制其干扰，谁知，装上一开机就烧坏了变频器，最后是通过加装电感器的办法来解决第二个问题的。吃一堑，长一智，这个教训为后来变频器排除电磁干扰的事积累了经验。到底是该在输出端安装 EMI 滤波器或是电感器，要具体问题具体分析，但是，大多数是安装电感器。

5 后记

虽然在控制变频器的 EMI 方面积累有一些经验教训，有的教训甚至是用外币换来的。但是笔者对变频器的干扰和控制仍知之甚微。我仍然十分愿意与同行切磋技艺，拜各位为师，继续深入学习，争取在用国产的、价廉物美的 EMI 滤波器或是电感器产品为大家服务方面有新的进步。

参考文献

- [1] Cor van de Water, Inverter design basics & waveforms;
- [2] 柳光福, EMI 滤波器的选用和安装;
- [3] 陈穷, 蒋全兴, 柳光福等, 电磁兼容性工程设计手册;
- [4] H. W. Off, Controlling EMI by proper PCB;
- [5] R. F. German, Use of a ground grid to reduce PCB radiation.