开关电源中EMC滤波器的的优化技术及其新型滤波装置的应用

Switching power supply in the optimization of EMC filter technology and its application in the new filter unit

吴康

摘　要：本文将对开关电源中EMC滤波器的的优化技术作研讨,并对基于优化技术的有源与无源滤波器功能与应用作分析说明。

关键词：电磁兼容，共模电感，拓扑结构，有源与无源，电力滤波

Abstract: the article to the optimization of EMC filter in the switching power supply technology, and the active and passive filter based on optimization technique, the analysis of the function and application.

Keywords: Common-mode inductor, Topology Structure, Active and passive, Power filter

0 前言

几乎所有的电气设备中都有开关电源或开关控制器的应用。通常要求开关电源的效率应尽可能高，空载下损耗应控制在毫瓦范围内。与之相反的要求则是：产品的综合成本应尽可能低。而 EMC 滤波器通常是此类产品优化方案中的重要组成部分。正确的 EMC 滤波器拓扑可以节省产品认证和优化电磁兼容性能的时间。此外，优化的 EMC 滤波器可以降低产品的成本和体积。由此引申出如何优化 EMC 滤波器的设计的课题及新型滤波器的研发与应用。为此本文将对开关电源中 EMC 滤波器的优化技术作研讨，并对基于优化技术的有源与无源滤波器功能与应用作分析说明。据此先对开关电源中滤波器设计时遇到的挑战与应对作说明。

1 开关电源中滤波器设计时遇到的挑战与应对

1.1 遇到的挑战

经发现开关电源的 EMC 发射（电磁发射）主要有传导发射与辐射发射两种形式。其传导发射频段一般在数 kHz 到 30MHz 之间；而辐射发射频段一般在 30MHz 到数 GHz。而降低传导发射通常使用 EMC 电源滤波器（即开关电源中的滤波器）可能会占整个产品的重要部分。然而滤波器设计中经常使用的技术，是“试凑”的方法，也就是不停的更换滤波器元件，如电容和电感，将它们焊接在一起，直到测量的干扰在电磁兼容标准限制内。但使用这种方案，设计者通常也无法了解改变这些参数之后会有什么影响。这就成为开关电源中滤波器设计时遇到的挑战。

1.2 应对措施与优化 EMC 滤波器设计

现在，不论瞬涉及的开关电源或开关控制器中的交流（AC）分量的大小如何，对其电磁兼容（EMC）性能的成功确认而言。输入滤波器都是一如既往的关键要求，因为开关控制器会在其连线上产生 AC 成分，所以会造成传导的 EMC 干扰。

优化 EMC 滤波器设计如今有多种新技术或拓扑结构，值此仅以 LC 型滤波器拓扑结构与动态实时跟踪补偿方式为例作研讨。

* 要应对滤波器设计时遇到的挑战或优化 EMC 滤波器设计，先了解干扰或噪声的类型很为重要。作开关电源 EMC 发射中的传导发射有差模噪声（DM）和共模噪声（CM）。因为此类噪声类型对于 EMC 滤波器的设计会产生重大影响。只有了解干扰类型、寄生参数和耦合路径，才能开始设计滤波器。

要在最短的时间内找到有效的解决方案，最重要的是采用结构化的优化设计。那就是因为我们应该知道干扰类型和所关心的频率范围。对于 1MHz 以上的干扰，应该考

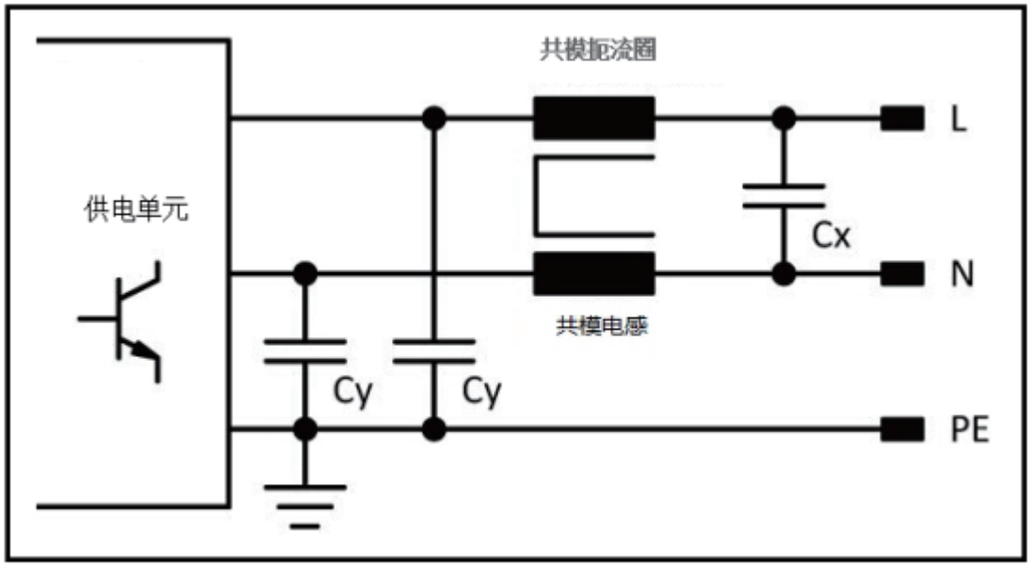

图 1 为 LC 型滤波器拓扑结构

虑滤波器元件的射频特性。考虑了滤波器元件寄生参数和频率特性的仿真，会带来更有效的解决方案，从而缩减开发时间，降低产品价格。故在应对 EMC 滤波器设计时的挑战，选用一个 LC 型滤波器拓扑结构是一种有效的优化设计途径，其图 1 所示是为 LC 型滤波器拓扑结构示意图。它是为了抑制共模干扰和差模干扰，最常见的 EMC 滤波器结构是 LC 型拓扑。正确选择电感非常重要。须考虑的要点之一就是共模电感、共模扼流圈的频率特性。

图 1 中的电容 Cy 是 Y 形联接的电容。这个电容形成一个返回至共模噪声源（开关电源的功率开关管对地）的低阻抗路径。图 1 中共模电感（L-CMM）构建了共模电流的高阻抗回路。Cx 是跨接直流电源线的电容，它与共模电感的漏感一起形成一个差模 LC 滤波器，用于抑制差模噪声。对差模噪声的下降造成影响的决定性因素就是滤波器的电感，毕竟该器件会抑制输入电路中电流的快速上升和下降。电感越大，其自谐振频率（SRF）就会越小。在实际应用中，滤波器电感数值最大可以选择取到 10uH，而这种电感器的自谐振频率则接近 30MHz。

电流超过滤波器电感的额定工作电流可能会导致线圈绕组的损坏。为了安全的原因，滤波器线圈的额定工作电流，要选择更大一些的。其滤波器的电容可以采用液体电解电容、聚合物电容或者陶瓷电容。唯一必须考虑的因素是，滤波器在转折频率处的品质因数要足够低。

* 采用目前最先进的动态实时跟踪补偿方式消除电网谐波，通过检测由非线性负载所产生的电流波形，分离出谐波成分，将其反相，同时控制绝缘栅双极型晶体管的触发，将大小相等、方向相反的谐波电流注入到电网中，实现了滤除谐波的功能。还可以提供超前或滞后的无功电流，用于改善电网功率因数。

2 基于优化技术的高效 EMC 滤波组件及其电力滤波装置的应用

基于上述优化设计技术可构建出高效 EMC 滤波组件及其电力滤波装置，并且逐步在各个领域获得应用。

2.1 高效 EMC 滤波组件

近年来在各类军用、航空、航天电子设备上应用的一种新型滤波装置。它将连接器与滤波器整合在一起，通过科学的电路和结构设计，在处理好设备的电源线传导骚扰的同时，对设备辐射骚扰也有非常好的抑制效果。根据客户要求，可将用户设备的单个或多个电源连接器或信号连接器整合在一起，并有针对性的滤除各个连接器的低频或高频干扰（10kHz~10GHz），提高电子设备的抗干扰能力及系统可靠性。 高效 EMC 滤波组件集电源、信号等多种滤波为一体，能有效地滤除低频和高频的干扰（10kHz~10GHz），能提高电子设备的抗干扰能力及系统的可靠性，使用方便，具有非常好的 EMI/RFI 抑制效果。现

代战争中战场电磁环境复杂多变，对单个系统或设备要求较高，所以必须对每个部件做特殊的处理，加装滤波组件。高效 EMC 滤波组件的使用不仅能降低自身的辐射能力，更重要的是提高了抗外界的强电磁干扰能力，使系统的战场适应能力大大提高。

其特点是集成度高、体积小、多功能一体化、抗外界干扰强、性能稳定可靠。应用范围广泛，可应用于航空、航天、兵器、舰船总参等军事领域以及邮电通讯、计算机、航海和各种仪器、仪表等设备中。其技术指标：可满足 GJB151A–97 的要求；产品有效滤除高频和低频干扰（10kHz~10GHz）；使用温度为 –55℃ ~+125℃；绝缘电阻：≥ 100MΩ。

2.2 新型电力滤波装置及应用

2.2.1 有源电力滤波装置脱颖而出

电能质量涵盖很广泛，如:功率因数低落、三相不平衡、电压骤降、电压稳定、电压闪烁、电压畸变、谐波共振等，这些项目可能影响电源系统之安全、增加系统耗能或两者兼具。生产设备长时间在不良的电源品质下运转，再加上配电系统本身若无其他保护设备时，无论是电力设备或生产设备直接承受来自电源的影响下，将使运转寿命大幅降低。而使用有源式滤波装置后可以改善功率因数低落、三相不平衡、电压稳定、电压畸变及谐波共振等因数，进而达到节能减排的目的。

* 运行特征　由于它是基于先进的动态实时跟踪补偿方式技术，因此采用电流互感器采集线路上的电流，经模拟／数字采样，将所得的电流信号进行谐波分离算法的处理，得到谐波参考信号，作为脉冲宽度调制（PWM）的调制信号，用此信号去控制 IGBT 单相桥，根据 PWM 技术的原理，将上下桥臂的开关信号反接，就可得到与线上谐波信号大小相等、方向相反的谐波电流，将线上的谐波电流抵消掉。这是前馈控制部分。再将有源滤波装置接入点后的线上电流的谐波分量反馈回来，作为调节器的输入，调整前馈控制的误差。图 2 为有源电力滤波装置基本架构示意框图。

* 谐波容量计算　谐波电流的计算涉及到诸多因素，对于常规项目而言，其谐波电流的计算可使用电能质量分析仪；对于新建项目，设计阶段电气设计人员并不能获取足够的电气设备谐波数据。鉴于以上情况，可根据众多行业的测试及经验总结，得到下列谐波容量计算经验公式。具体可按集中治理与就地治理二种应用方式不同，则其计算公代也不同。

其一、集中治理应用方式的谐波容量计算公代式如下：

$$I_h=\frac{S\times K}{\sqrt{3}\times U\times\sqrt{1+THDi^2}}$$

其公式参数介绍：S 为变压器额定容量；U 为变压器二次侧额定电压；I_h 为谐波电流；THDi 为电流总谐波畸变率；K 为负荷率。

上式适用于在变压器二次侧进行集中治理。此处的 K 为变压器的负荷率，变压器设计时的取值范围一般为 0.6~0.85。

其二、就地治理应用方式的谐波容量计算公代式如下：

$$I_h=K\times I_n\times\frac{THDi}{\sqrt{1+THDi^2}}$$

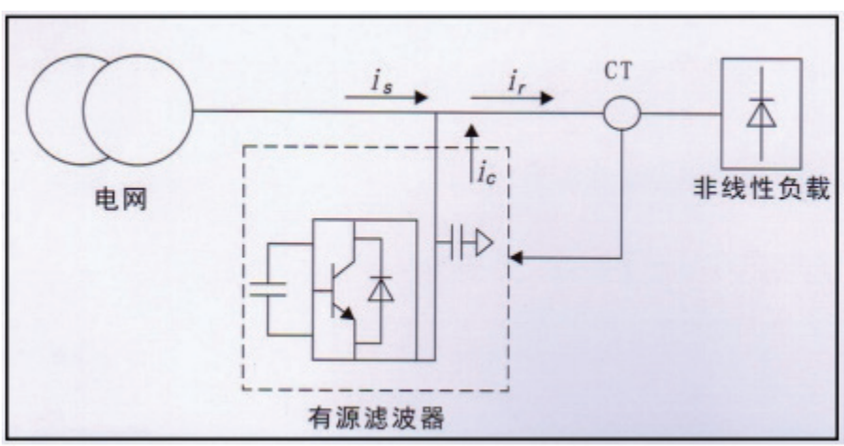

图 2 为新型有源电力滤波装置基本架构示意框图

其中，I_n 为设备的额定电流，K 为负载设备的负荷率，若负载在满负荷情况下运行，则 K 的值为 1。

* 新型有源电力滤波装置功能特点为：超强的滤波能力，谐波滤除率高，有效滤除率可达 97%；可滤除 2~50 次谐波，且可以任意选择特征谐波进行滤除，各次谐波补偿可分别设定；采用双数字信号处理（DSP）+ 现场可编程逻辑门阵列（FPGA）闭环控制系统。具有多种工作模式：具有“谐波补偿”、“谐波无功混合补偿”、“不平衡补偿”；运行稳定可靠、安装维护方便，多机并联运行；故障自诊断功能；可搭配软件实现远程监控，简单易用；HM1 人机界面，简单易懂，方便操作；完整的保护功能，日常检查简单，机器免维护。

* 应用特征与举例

电力滤波装置的应用有集中治理与就地治理二种应用方式。

其一、集中治理应用方式就是针对整个配电网络进行治理，见图 3（a）有源电力滤波装置在整个配电网络中的配置所示框图；

其二、就地治理应用方式就是针对电网中的大功率变频器、晶闸管相控电源、UPS 或中频炉等非线性负载中对某支路单独进行治理（见图 3（b）为有源电力滤波装置在就地治理应用方式的配置所示框图），此方式是谐波治理最佳方案，具有治理效果最好、节能效果最显著等优点。图 3（b）为有源电力滤波装置在就地治理应用方式的配置所示框图。

2.2.2 无源电力滤波装置的构建方案

* 问题的提出 输电及配电系统是运行于固定频率的正弦波电压及电流波形下。然而非线性负荷，如：晶闸管、变频器、电弧炉接入系统会产生大量的谐波电流而导致系统电压及电流畸变。据此挑战，则无源电力滤波装置开发是消除电力系统谐波畸变的最佳方法，同时在基波频率产生无功功率。

* 设计方案 典型的无源滤波装置回路应包含三种最为常见的谐波（5 次、7 次、11 次）频率。无源滤波装置可根据需要的无功功率由功率因子调整器自动投切，它和自动投切的电容器的控制方式可以相同。并能根据客户的具体应用要求采用标准器件设计，这样确保以合理的投资获得最好的功率因子补偿和谐波滤波特性。为此它的技术参数设定为：电源电压为 400V，滤除阶次为 5、7、11 等，基波频率为 50Hz，输出容量达 93 ~ 231kvar。

无源滤波装置回路由特殊专用电容、电抗组成。无源滤波装置的电容器在基波频率时产生无功功率，电路根据要达到的功率因子作补偿设计。而电抗器的电感值选择是与电容器串联谐振对谐波形成低阻抗电路，让大部分的谐波电流流入谐波滤波器。无源滤波的原理就是用电抗器和电容器配合形成针对某次谐波的低阻抗通道让该次谐波流入。其技术特征可由下图 4 特性曲线表述。

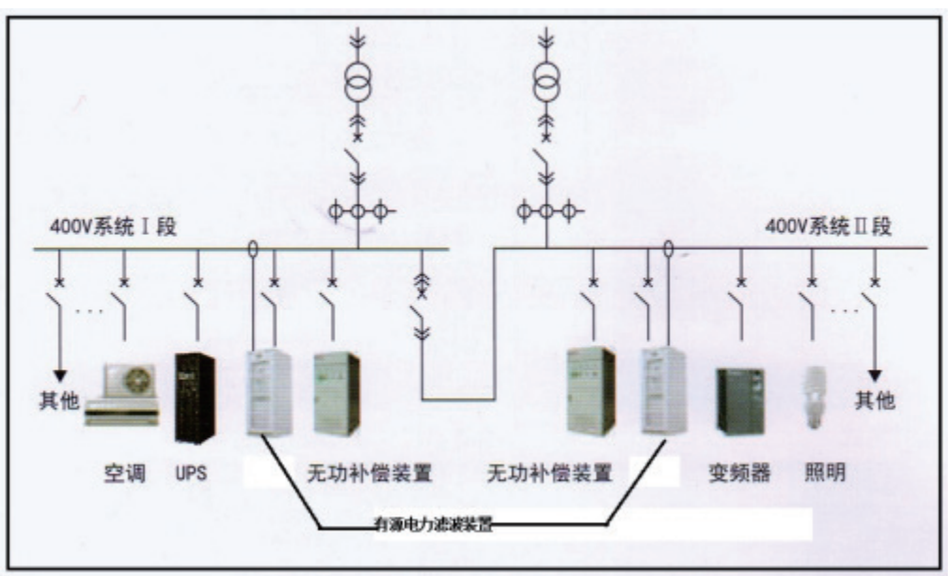

图 3（a）有源电力滤波装置在整个配电网络中的配置所示

下转151页