

飞兆半导体特稿
2009年8月

利用交错式 BCM 提高PFC级的效率

作者：飞兆半导体欧洲分公司功率转换及工业系统市场开发经理Jon Harper

引言/摘要

在节能运动的大趋势下，功率因素校正 (Power Factor Correction, PFC) 的需求不断成长。PFC 利用降低峰值电流，并把谐波电流减到最少，从而减少配电网的能耗。随着照明、电源和马达控制 (motion control) 领域的最新节能规范草案推出，将进一步增加市场对 PFC 的需求。例如，相比简单 TRIAC 控制驱动的感应电机，逆变器驱动的永磁同步电机拥有更高的效率、但功率因素却较差；但只要额外增加一个 PFC 级，就可以提高功率因素，以及减少配电网中谐波电流引发的损耗和其它问题。所以，PFC 级必须具有很高的效率，这样才不会削弱采用新型电机所带来的好处。

模拟控制电路集成度的提高，催生出可进一步提高效率的最新 PFC 技术。对于 300W至1000W以上的输入功率级，交错式临界传导模式 (boundary conduction mode, BCM) PFC方案是非交错式连续传导模式 (continuous conduction mode, CCM) PFC方法的良好替代方案。本文将概述交错式 BCM PFC的工作原理及优点。

工作原理

交错式的运作原理是一种十分成熟、广泛运用于功率电子产品的技术。大多数微处理器都由多相同步降压电源驱动。在交错技术中，有两个或更多的并联输出级，而每一个的开关时间均不同。BCM PFC 和 CCM PFC都可以采用这种技术。大多数 PFC方法采用了一个升压级，而两个交错式输出级会共享同一个输出电容。如图1所示。

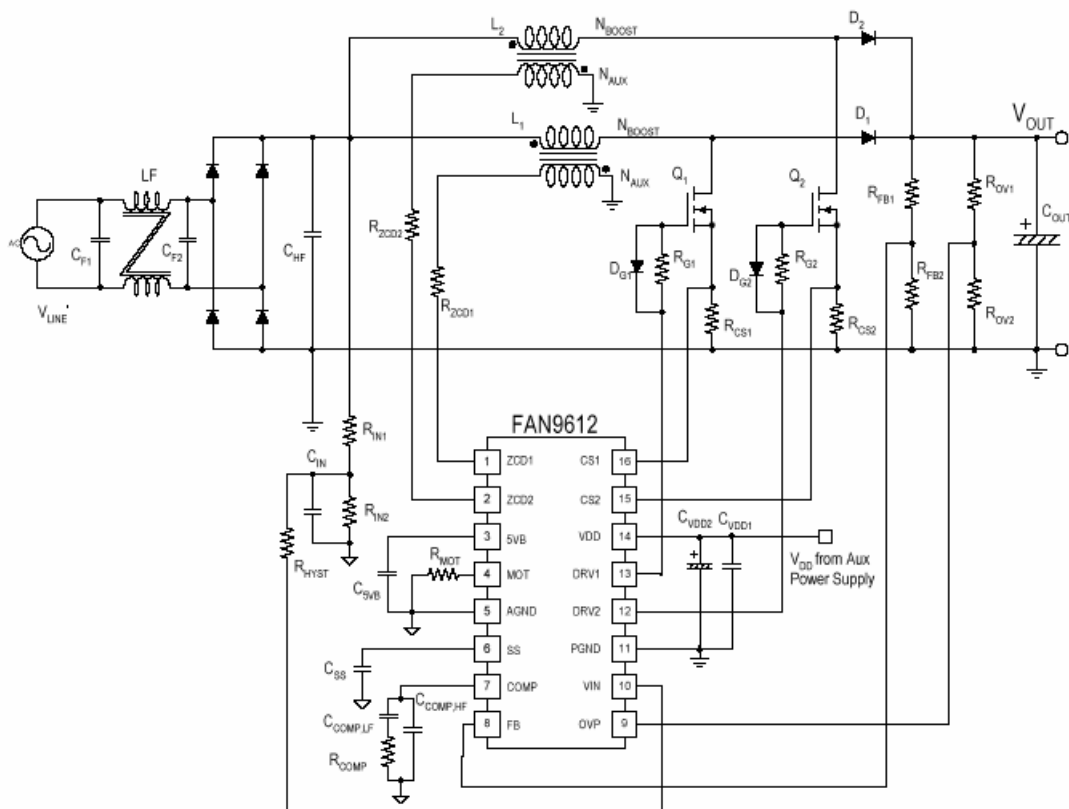


图1：交错式临界传导模式电路

交错式运作的第一个特性是输入和输出级上的PFC纹波电流都会被降低。这两个级与一个特殊电路同步，确保彼此能维持180度异相开关。这个同步电路的性能也许是交错式 BCM 控制器最关键的部分，而同步的困难性正是该项技术未能及早应用的主要原因之一，这些内容将于稍后阐述。

在一个完全同步的交错式BCM PFC系统中，第一相的电流消耗量会部分抵消掉第二相的电流，如图2所示。总体输入电流和电容电流的纹波成分要低得多，频率是各级纹波频率的两倍。这些因素简化了用来减少输入纹波电流谐波成分以满足EMI标准要求的 EMI 滤波器规格。如果采用相同的电容，流经输出电容的纹波电流将会减少，便可以延长系统寿命；而若改变输出电容大小以配合更低的额定纹波电流，就能够降低系统体积和成本。

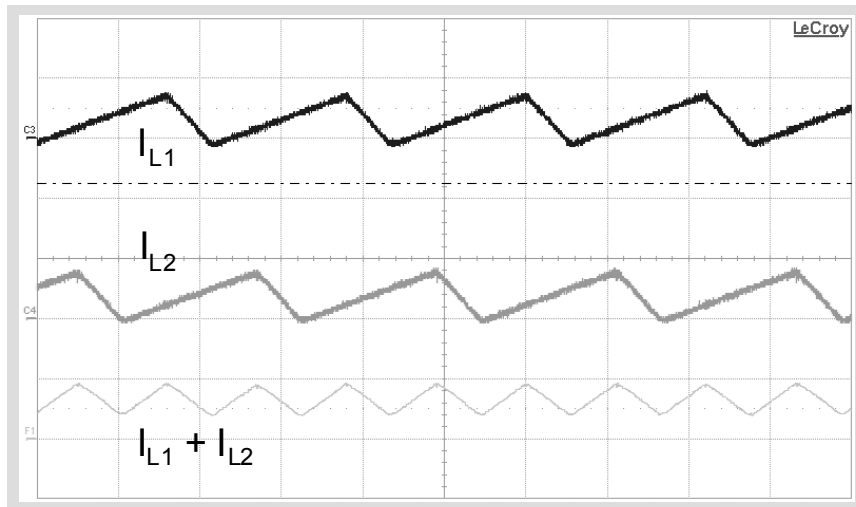


图2：交错式BCM PFC电路中的纹波电流

交错式运作的第二个特性是流经每一级的电流都会减半。如果交错式方案中采用的MOSFET的 $R_{DS(on)}$ 正好是非交错式中的两倍，或者说，如果这些开关所用的硅面积相同，这对传导损耗没有任何影响。不过在这种情况下，开关损耗可能会降低。较小的MOSFET的栅极电荷只有一半，并只在非交错式方案的一半电流时进行开关，这样一来，每个器件的开关损耗只有四分之一，或总体开关损耗减半。这里需要考虑诸如更高的开关 dv/dt 等效效应。

由于交错式控制器采用比标准 BCM 控制器更先进的技术，故有可能进一步提高开关效率。飞兆半导体公司的 FAN9612 交错式 BCM PFC 控制器具有两项显著优点，能够提高升压电路的效率：其一是毋须额外的 RC 延时电路就可以准确执行零电压开关点的检测。这是因为标准 BCM 控制器在升压电感线圈过零时导通，而 FAN9612 则在零电流点进行开关的缘故；第二个优点是它采用两个单独的感测电阻来检测每个 MOSFET 的实际过流情况，这不仅增强了系统可靠性，还降低了总体电阻损耗。

纹波电流的减少、纹波电流频率的增加，以及效率的提高，使交错式运作功率范围扩大了两倍以上。比如标准 BCM PFC 的最大应用功率为 300W，而交错式 BCM PFC 则可达 800W 或以上。

交错式 BCM PFC 与标准 CCM PFC 的比较

在 BCM PFC 级中运用交错方式，能把工作功率扩大到了原来非交错式 CCM PFC 级的覆盖范围。这时，传统的非交错式 BCM 与 CCM 比较已不再适用，故比较这两种方案自身优点是十分重要的。

讨论的第一点是电感尺寸。以拥有宽输入范围(85Vac – 265Vac)的400W电源设计为例，利用FAN9612的应用手册上的计算结果 [注1]，可得到220uH电感量以及7A峰值电流。而利用CCM 控制器，在相同条件下 [注2] 得到的电感量为790uH、峰值电流为8A。值得注意的还有在相同功率级下，非交错式BCM控制器的电感规格为110uH 和 14A，这进一步说明了在同一功率级下，非交错式BCM性能较差的原因。

对于小巧型设计，400W 的交错式 BCM PFC电源可采用两个基于PQ3220磁芯的电感。而CCM PFC采用的磁芯尺寸估计在PQ4040左右。

第二个考虑事项是升压二极管的反向恢复损耗。在连续传导模式中，当有电流流经时，升压二极管便会进行开关。由于在导通期间这个电流流经了升压 MOSFET，故会导致额外的开关损耗。此外，因为快速开关转换的缘故，所以这个额外的电流尖峰还会带来共模 EMI问题。在实际的 CCM PFC 电路中，这可是更难解决的一个问题。而由于交错式 BCM PFC 工作中没有体二极管传导，因此开关损耗要小得多，从而拥有提高效率，还有减少共模 EMI 的优点。

开关损耗的另一个来源是输出电容。对于低输入线电压条件，BCM PFC电路(如基于FAN9612的产品)因为控制器会处于等待状态，直到关断后谐振电压波形的最小点出现，故可实现零电压开关。这样一来，就没有MOSFET的输出电容放电所引起的损耗。在CCM PFC应用中，MOSFET总是在瞬时输入电压下导通，这意味着不会有任何零电压开关发生。

虽然交错式 BCM PFC电路的传导损耗比 CCM PFC应用的更高，不过，初步的比较清楚地显示，由于 CCM PFC应用的开关损耗更高(即使在 CCM 电路中采用了高性能的二极管和 MOSFET)，因此弥补上述的缺点。总言之，一般而言，交错式 BCM PFC电路更有效。

相比采用CCM，采用交错式BCM也更易于处理EMI问题。EMI主要源于差模噪声，这可采用一个输入滤波器来解决，而固有频率变化和低频纹波电流则可使这个任务更容易完成。在CCM系统中，输出二极管的振铃现象会产生共模噪声，这需要利用昂贵的碳化硅二极管来解决。

同步与软启动

把两个交错式升压级同步是一个大难题，不过这已在 FAN9612 上成功解决了。虽然稳态条件下的同步比较简单，但在启动和负载变化条件下的各种同步动态，使交错式 BCM PFC 成为集成电路系统设计人员的一个艰巨挑战。

在轻载条件下，如果两相都维持导通，效率将会很低。因此，在轻载下最重要的一点是要关断一个负载，并在负载增加时，再使其重新导通。而该电路在单个开关周期内对这些变化作出反应。

图3所示为相位迭加和切相示意图，并显示每个MOSFET的栅极和流经每个MOSFET的电流。在相位迭加和切相时，都无任何瞬态工作。

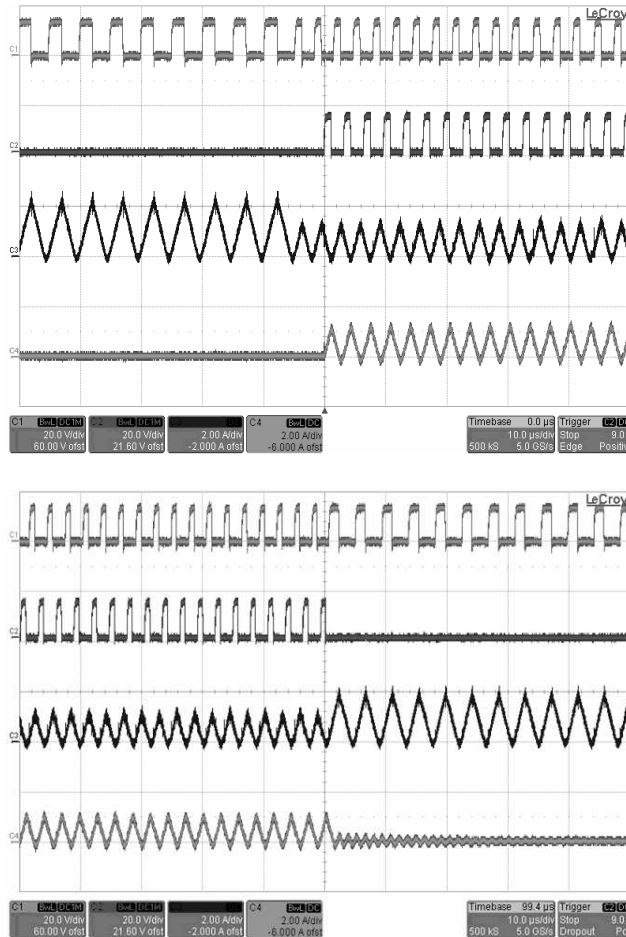


图3：交错式 BCM PFC中的切相和相位迭加

FAN9612 采用的不是开环式，而是闭环式的软启动，从而避免了这类应用中常见的输出电压过冲现象。由于在 PFC 电路中存在着一个大输出电容，必须在对它进行充电之余，同时避免令控制环路饱和，因此软启动是PFC电路的一个问题。

总而言之，FAN9612 解决了交错式 PFC 设计中存在的两大难题。

参考文献：

注 1：飞兆半导体公司应用手册 AN-6086 《采用 FAN9612 设计交错式临界传导模式 PFC 的考虑事项》

注 2：飞兆半导体公司应用手册 AN-6032 《FAN4800 组合式控制器应用》