

# 并联交错 Boost PFC 驱动技术的仿真研究

## Simulation Study on Driving Techniques in Parallel Interleaved Boost PFC

苗海亮 雷淮刚 陈辉 上海大学 (200072)

杨喜军 上海交通大学 (200030)

Miao Hai liang Lei Huai gang Chen Hui Shanghai University(200072)

Yang Xi jun Shanghai Jiaotong University(200030)

**摘要:**基于 Boost PFC 的双闭环工作原理建立了单相双重并联交错 Boost PFC 的 PSpice 仿真系统,结合耦合、分立两种升压电感使用方式,重点对并联交错 Boost PFC 的两种驱动技术(同步驱动、分频驱动)进行了仿真分析,并与传统 Boost PFC 方案进行了比较。仿真结果表明,交错 Boost PFC 系统具有输入电流纹波低,开关应力小等优点,而且升压电感量可得到降低;在同样条件下,该方案可以降低高频 EMI 干扰和单个器件容量,大大降低系统成本,具有良好的应用前景。

**叙 词:**并联交错 Boost PFC 同步驱动 分频驱动 电流纹波 开关应力

**Abstract:** In this paper, two driving techniques (Synchronous drive and Frequency-divided drive) in the Parallel interleaved Boost PFC (PBPF) is emphatically analyzed, associated with coupled inductance and separate inductance, based on the PSpice simulation model of dual closed loop of Boost PFC. The Boost inductance current and size, switching stresses, input ripple current are expressed analytically and compared considering the conventional Boost PFC as reference by the simulation results. On the same conditions, the high-frequency electromagnetic interference (EMI) and device volume are reduced, and so the PBPF system cost, indicating the favourable application prospect of PBPF.

**Keywords:** parallel interleaved boost PFC synchronous drive frequency-divided drive input ripple current switching stress

## 1 引言

随着谐波限制标准要求的日趋严格,功率因数校正(PFC)方案的应用也越来越广泛。Boost PFC 具有拓扑简单、电压提升、能效高等优点,因而被广泛采用。但是,当输出功率较大时(3kW-5kW),输入电流纹波增大,导致功率器件承受很大的电流应力,不利于系统的稳定运行。采用双重并联结构的交错 Boost PFC 不但可以减轻上述不足,还可以大大降低所需升压电感量<sup>[1]</sup>。借助于计算机进行电路仿真研究有利于电路分析和参数优化,因此本文利用 OrCAD Pspice 软件中丰富的计算功能,根据 Boost PFC 电路双闭环控制结构建立了并联交错 Boost PFC 系统仿真模型,该模型与实际电路结构紧密结合,且仿真效率较高。在该模型基础上,针对耦合升压电感和分立升压电感两种方式,对交错结构 Boost PFC 的驱动技术进行了仿真分析。

## 2 并联交错 Boost 变换器

### 2.1 两种驱动技术

并联交错 Boost 变换器是由两个单端 Boost 变换器并联而成,每一个单端变换器承担 50% 输出功率,其拓扑结构如图 1 所示。

该变换器在工作过程中,需对单端变换器交错瞬间进行精确控制,以保证变换器之间的电流均衡。因此对驱动技术的研究很有必要。下面就同步驱动(功率开关 S1、S2 同时导通和关断)和分频驱动(交叉开通、关断)两种驱动技术进行分析。

#### (1)同步驱动方式

在大电流应用情况下,采用同步驱动方式可以达到降低输入电流纹波,减轻功率器件电流应力的目的,其 PWM 信号见图 2(a),在实际应用中,由于器件参数的差异,需要考虑两变换器的均流问题

#### (2)分频驱动方式

分频驱动是使 S1、S2 的 PWM 驱动信号有 180° 的相位差,也就是严格同步交叉开通、关断,其 PWM 信号见图 2(b)。在开关频率恒定情况下,分频驱动方式易于实现,除了具有电流纹波低、电流应力小等优点外,变换器间的均流问题也得到了解决。

### 2.2 损耗分析

在 Boost PFC 电路中,升压电感的损耗(体现为温升)和功率器件的损耗对系统的可靠性和效率影响很大,在大电流应用场合尤其明显。在功率器件总损耗中二极管关断损耗占大部分,二极管在关断时产生的反向恢复电流不但造成二极管本身损

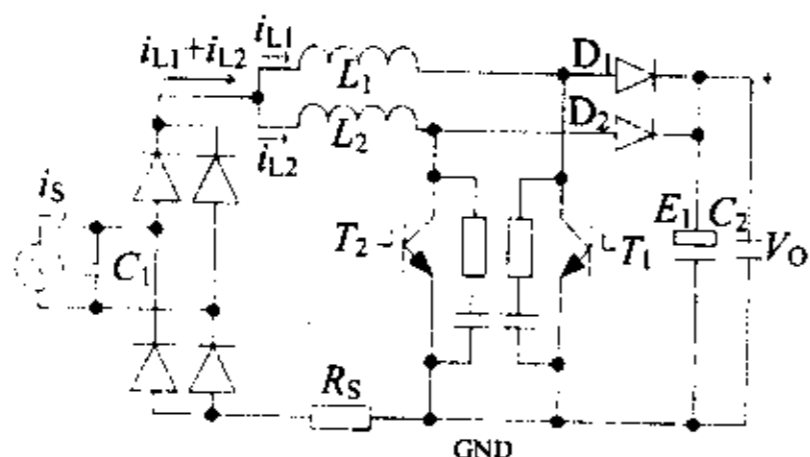


图1 并联交错 Boost 变换器拓扑

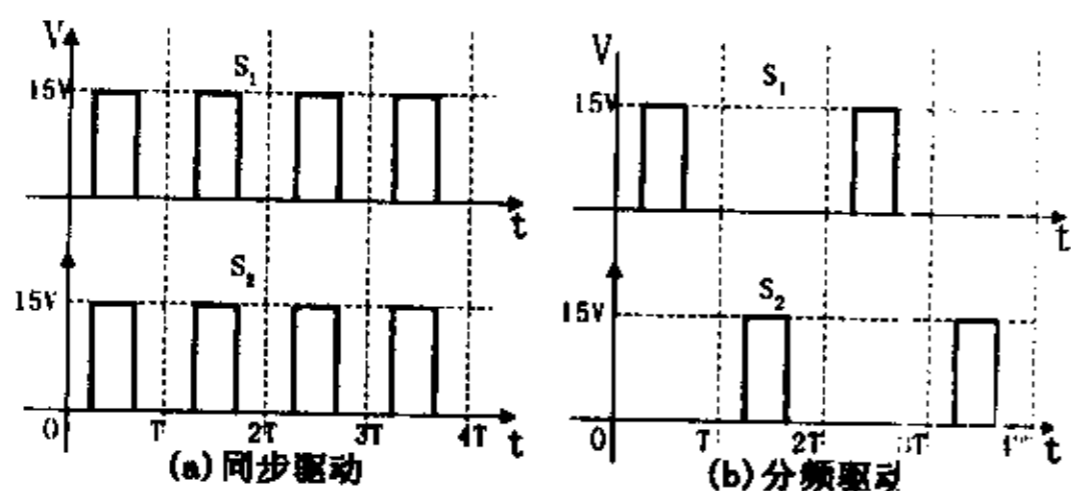


图2 PWM 驱动脉冲信号

耗,同时也增加了开关管的开通损耗,并产生较大的 EMI 干扰<sup>[2]</sup>。Boost 升压电感的正常工作取决于磁芯的最大磁通密度和最大磁通摆幅,在连续电流工作(CCM)模式下,即取决于电流的直流和交流脉动分量。在并联交错 Boost PFC 中,采用耦合电感的方式(如图3)可以减小磁芯磁通摆幅(即电流的交流脉动分量),降低磁芯损耗,提高磁芯利用率。

### 3 并联交错 Boost PFC 的 PSpice 仿真模型

基于基本 Boost PFC 的双闭环工作原理,构建 PFC 控制系统的 PSpice 仿真系统,其仿真模型见图4。在仿真过程中,结合使用耦合电感和分立电感两种绕制方法,对上述两种驱动方式进行了仿真,并与单重 Boost 方案进行了比较。

对于采用平均电流控制 PFC 电流来说,其控制为双闭环结构。其中由电压外环决定电流内环参考信号,使电路输入输出功率保持平衡。通过电流内环控制开关通断,使输入电感电流实现对电流参考信号的精确跟踪。在实际电路中,电流内环参考信号是由电流与电压同步的信号  $KU_{IN}$ 、电压外环调节器输出  $A_{vout}$  和输入电压有效值  $U_{RMS}$  三路信号按式(1)综合后得到的<sup>[3]</sup>;

$$I_{REF} = KU_{IN}A_{vout} / U_{RMS}^2 \quad (1)$$

在电路模型中,我们利用乘法器实现了上式。对于  $1/U_{RMS}^2$  项,电路需做一次平方和一次除法运算,这将使仿真模型的复杂性和仿真占用时间增加。为此,在建模中采用离线计算,然后将其作为式(1)的相乘因子。对于电流调节器,模型与实际电路一致。在实际电路工作时,由电流调节器的输出与稳定的锯齿波进行比较来控制开关通断。

### 4 仿真结果与分析

在所建立仿真模型的基础之上,对基本 Boost PFC 电路、并联

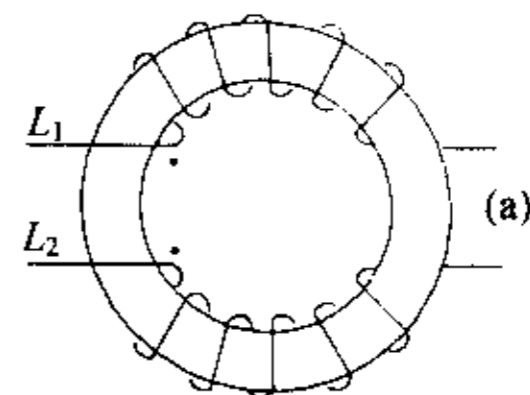


图3 耦合电感 (直流侧使用)

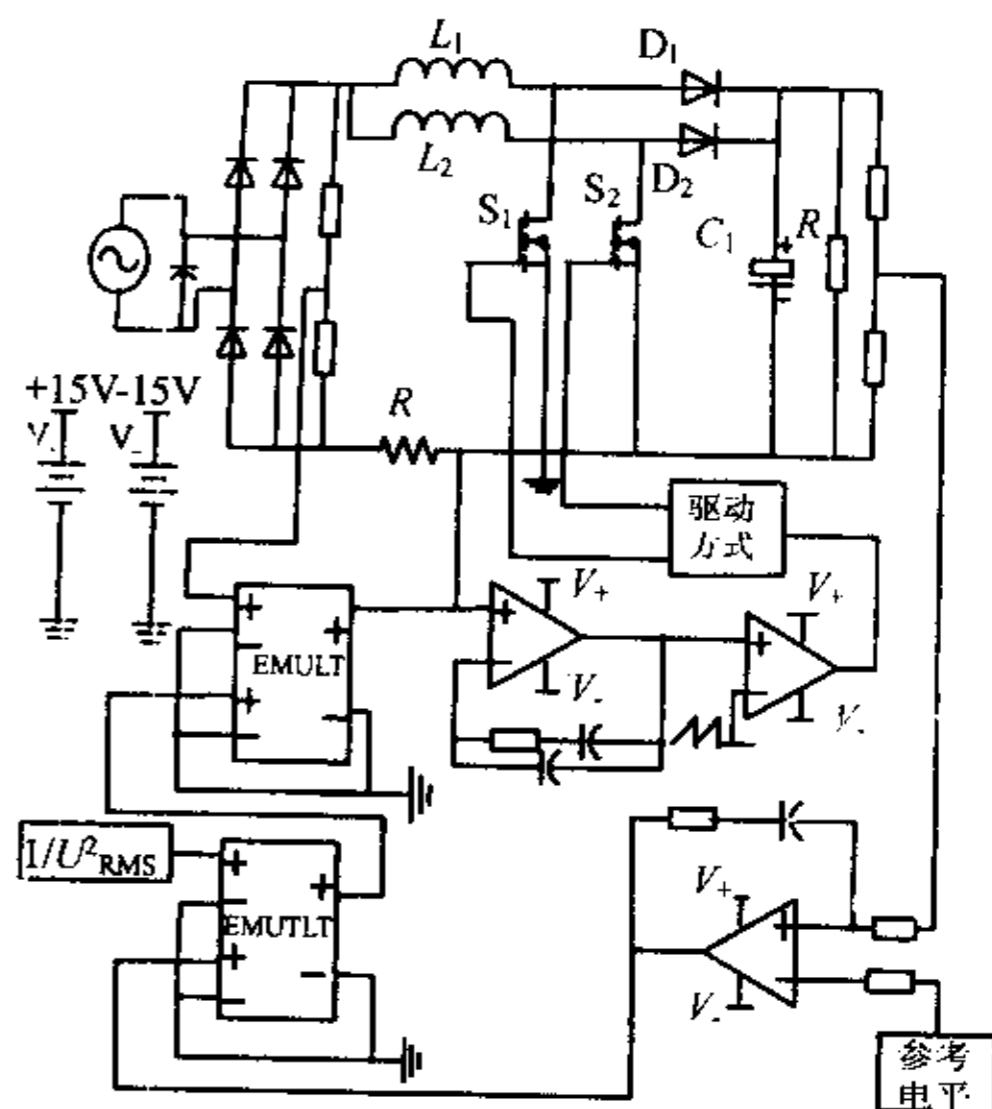


图4 并联交错 Boost PFC 的 PSpice 仿真模型

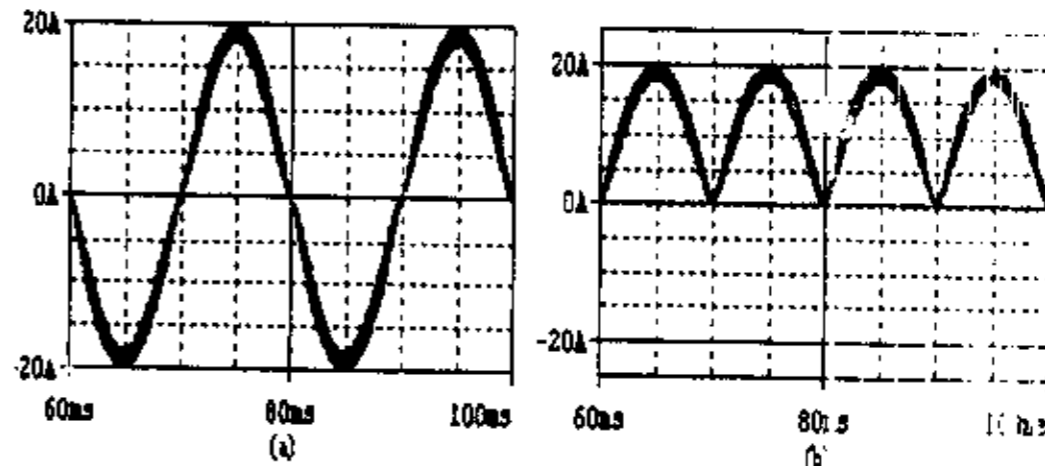


图5 单重 Boost PFC 输入电流(a)和电感电流(b)

交错 Boost PFC 电路进行了仿真验证。在并联交错结构中,仿真结果因驱动技术而异,即使在相同的驱动条件下,由于电感的绕制方式不同,所得的结果也不相同。

仿真条件:输入交流电压 220VAC,输出直流电压 400VDC  
输出滤波电容 1000 $\mu$ F,开关频率 50kHz

单重 Boost PFC 仿真电路中采用的升压电感为 1mH,在并联交错 Boost PFC 仿真电路中每一升压电感的电感量为 0.3mH,其他参数保持一致。以下给出仿真结果:

图5为单重 Boost PFC 输入电流和电感电流波形,在大电流情况下,单个器件所承受的电流较大,由此引起功率器件损耗加大,特别是快恢复二极管反向恢复电流加大引起很强的 EMI 干扰,不利于整个系统的稳定工作和效率提高。

图6为采用同步驱动技术的并联交错 Boost PFC 输入电流和电感电流波形,其中(a)、(b)为耦合电感同步驱动方式时的波形,(c)、(d)为分立电感同步驱动方式时的波形。通过对比发现,功率器件上所分配电流均降低了一半,电流应力得到降低;采用耦合电感对降低输入电流纹波效果更佳。

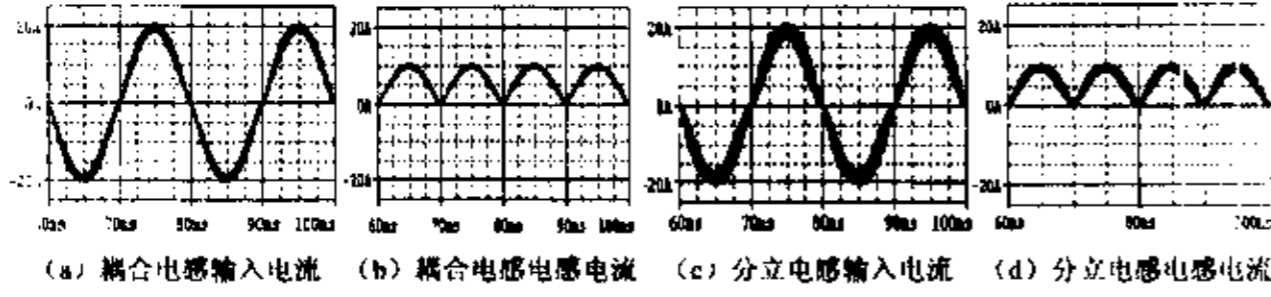


图6 采用同步驱动技术的并联交错 Boost PFC

图7分频驱动方式并联交错 Boost PFC 输入电流和电感电流波形,其中(a)、(b)为耦合电感分频驱动方式时的波形,(c)、(d)为分立电感分频驱动方式时的波形。由图7(a)、(b)可以看出耦合电感分频驱动方式输入纹波电流较单重 Boost 方案低,两个电感电流均工作在断续状态,所分配的电流峰值并未减小,但由于共用一个磁芯,磁芯的磁通摆幅反而得到降低;从图7(c)、(d)发现分离电感分频驱动方式输入纹波较大,但功率器件上分配的电流峰值降低为一半,电流应力得到降低。

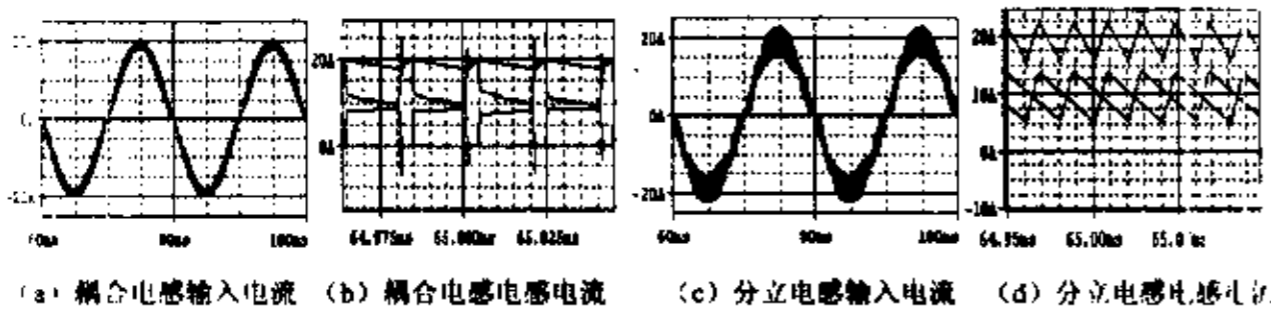


图7 分频驱动并联交错 Boost PFC

采用同步驱动技术的并联交错 Boost PFC 在实际应用中需要考虑器件间的均流问题,而采用分频驱动技术的并联交错 Boost PFC 则无需考虑此问题。

## 5 结论

并联交错 Boost PFC 降低了电流应力和输入电流纹波,但同时所用电感和功率器件的数量成倍增加,因此它适用于输入电

流纹波和开关损耗为考虑重点的大电流应用场合下。

从降低输入电流纹波的角度考虑,耦合电感并联交错 Boost PFC 采用上述任意一种驱动技术所达到的效果,都较分立电感并联交错 Boost PFC 好;从降低单个器件电流应力的角度来讲,情况因驱动技术不同而异:同步驱动脉冲下,耦合电感方式及分立电感方式都可达到目的;分频驱动脉冲下,分立电感方式比耦合电感方式要好。实际应用并联交错 Boost PFC 时,所采用的方案要各方权衡确定,但总的来说,并联交错 Boost PFC 在大电流应用场合下取代单重 Boost PFC 具有相当的优势,具有很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] B. A. Miwa, D. M. Otten and M. F. Schlecht- "High efficiency power factor correction using interleaving techniques"- Proceedings of APEC'92, pp. 557-568, 1992.
- [2] 曹建安,裴云庆,王兆安. "Boost PFC 电路中开关器件的损耗分析与计算, 电工电能新技术, 2002, (1):41-44.
- [3] Philip C. TODD. UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design. U. S. A: Unitrode Application Note, 1999: 3-269 ~ 3-288.
- [4] 张占松,孙时生,伍言真. 电路和系统的仿真实践. 北京:科学出版社, 2000
- [5] C.-S. Lin, T.-M. Chen and C.-L. Chen. Analyses of low frequency harmonics for continuous conduction mode boost power factor correction. IEE Proc.-Electr. Power Appl, 2001 148(2): 202-206

## 作者简介

- 苗海亮,男,1977年生,硕士,研究方向:电力电子与电力传动。
- 雷淮刚,男,1968年生,副教授,研究方向:电力电子与电力传动。

(上接第 828 页)

- [2] L. Gyugyi and B. P. Pelly. Static Power Frequency Changers: Theory, Performance and Application. Wiley-interscience, New-york, 1976
- [3] D. J. Holmes and T. A. Lipo. Implementation of A Controlled Rectifier Using AC-AC Matrix Converter Theory. IEEE PESC'89: 353 ~ 359, 1989
- [4] S. Bernet, R. Teichmann. The Auxiliary Resonant Commutated Pole Matrix Converter for DC-Application. IEEE PESC'97: 1225-1231, 1997
- [5] Juan B. Ejea, Esteban Sanchis, Agustin Ferreres, Jose A. Carras-

co, Rafael De La Calle. High-Frequency Bi-directional Three-phase Rectifier Based on a Matrix Converter Topology with Power Factor Correction, IEEE APEC'01: 828-833, 2001

## 作者简介

- 蔡文,女,1971年生,博士生,研究方向:电力电子与电力传动。
- 龚幼民,男,1939年生,教授,博导,研究方向:电力电子与电力传动。