

一种快速多相变换电感电压调节器

於汉斌

江西省高新超越精密电子有限公司

前言

数据中心采用功能强大的应用于特定的集成电路 (ASIC), 这些电路消耗大量电流, 例如高达 1000 安培, 并且其功率需求波动迅速。由于各种因素, 例如较大的输出阻抗、去耦电容器占用的空间越来越大等, 传统上为此类负载供电的多相电压调节器正达到其性能极限。本文描述了一种多相变换电感电压调节器 (TLVR)。TLVR 的每相都有一个输出电感器, 该电感器是变压器的二次绕组, 其一次绕组都连接在串联回路中。相位由交错脉冲宽度调制 (PWM) 波形驱动。在负载瞬态的情况下, 调整相位 PWM 波形的占空比, 以使所有相位响应变化的电流。其结果是极快的瞬态响应, 与负载的电流强度和带宽要求相匹配。

背景

数据中心采用功能强大的集成电路, 例如 CPU、GPU、机器学习加速器、网络交换机、服务器等, 这些集成电路消耗大量电流, 例如高达 1000 安培, 并且功率需求波动迅速。多相电压调节器 (VR) 传统上用于为此类负载供电。为了跟上负载电流和带宽的增加, VR 的相位计数和输出去耦电容都有所增加。这在一定程度上改善了传统虚拟现实的瞬态响应; 然而, 由于其较大的输出阻抗、去耦电容器 (多层陶瓷或聚合物类型) 占用的空间以及去耦电容器与负载之间的距离, 传统 VR 正在达到性能极限, 例如, 根据瞬态响应和电流源容量测量。

改善传统 VR 的其他技术, 例如增加开关频率和 / 或降低电感, 虽然改善了瞬态响应, 但是却以牺牲效率为代价。耦合电感技术具有相对较低的漏感, 因此具有相对较快的瞬态响应。然而它在应用中包含太多的库存单元, 并且也很难制造。

图 1 示出了传统多相电压调节器的操作。图 1A 示

出了包括 N 相的电路拓扑。在本例中, N=6。VR 的每个相位由相位交叉的脉宽调制 PWM 波形 (图 1B) 驱动。PWM 波形由 PWM 控制器独立控制, 该控制器可根据负载调整占空比。图 1C 示出了每个相位中的输出电感电流, 其总和馈送至负载。当负载瞬态发生时, 例如, 电流需求突然增加, 每个相位的占空比增加 (102) 以增加输出电流。然而, 特定相位占空比的增加仅增加该相位 (104) 的输出电流。为了使总输出电流与增加的需求相匹配, 多相必须增加其输出; 这样做所需的时间太长, 令人无法接受。结果是总输出电流的转换率较低, 例如, 对负载瞬态的 VR 响应较慢。

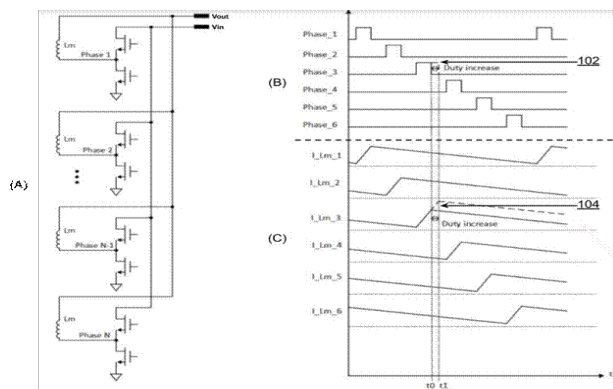


图 1 : 传统多相电压调节器的操作。

其中 A 为电路拓扑图 B 为在负载瞬态期间驱动每个相位 C 为电压调节器响应的 PWM 波形

图 2 示出了传统十二相电压调节器的瞬态响应, 该电压调节器具有 750 kHz PWM 驱动波形、每相 70 nH 的电感和 6 mF MLCC 去耦电容。图 2A 示出了负载瞬态, 在本例中, 负载瞬态以每纳秒 2 安培的速率从 100 安培变为 500 安培。图 2B 示出了 VR 的电流输出; 由总输出电感引起的缓慢响应是明显的。图 2C 示出了 VR 输出电压的不稳定性, 例如, 由负载瞬态引起的高达 45 mV 的下垂。

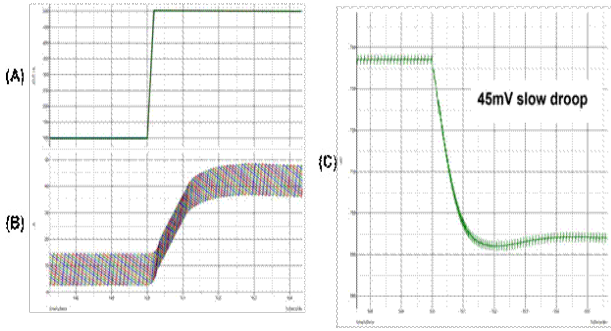


图 2：传统多相电压调节器的瞬态响应。

(A) VR 的负载瞬态 (B) 电流响应 (C) VR 的输出电压响应

正文

本文描述了一种多相变换电感电压调节器 (TLVR)，其示例拓扑如图 3 所示。图 3A 示出了 N 相单级 TLVR，图 3B 示出了 N 相双级 TLVR。以类似的方式，可以定义 N 相三级级、 N 相四级级等 TLVRs。TLVR 的每相都有一个输出电感器 (302a-b)，该电感器是变压器的二次绕组，其一次绕组 (304a-b) 全部连接在串联回路中。在负载瞬态的情况下，调整相位 PWM 波形的占空比，以使所有相位响应变化的电流。其结果是极快的瞬态响应，与负载的电流强度和带宽要求相匹配。

每相的输出电感器携带直流和磁化纹波电流。如上所述，每个输出电感器绕组是变压器的二次绕组，与变压器的一次绕组紧密耦合，泄漏可忽略不计，例如，耦合系数 K_{ps}

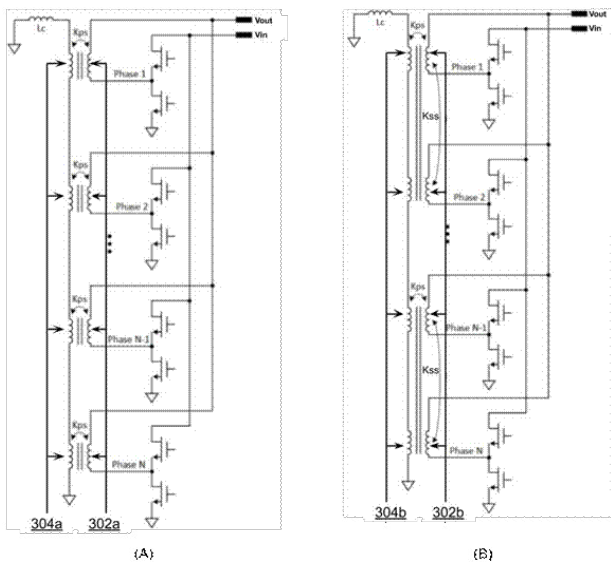


图 3：多相跨电感电压调节器 (TLVR)。

(A) 单辅助 TLVR (B) 双辅助 TLVR

接近统一。主匝数与次匝数之比通常为 1:1 (或更高)。一次绕组连接在串联回路中，具有附加补偿电感 L_c ，并接地。

在单个二次 TLVR (图 3A) 中，每个磁芯有一个一次绕组和一个一相的二次绕组。在双级 TLVR (图 3B) 中，每个磁芯有一个初级绕组和多个次级绕组用于多相。在双级 TLVR 中，次级间耦合系数 K_{ss} 远小于 K_{ps} 。例如，6 相 VR 可以使用基于单二级结构的 6 个磁芯，或者使用基于双二级结构的 3 个磁芯。

图 4 示出了基于理想变压器、磁化电感器 (L_m) 和漏电电感器 (L_r) 的 TLVR 的等效电路。图 4A 示出了单次 TLVR，图 4B 示出了双级 TLVR。在图 4B 中， L_c/N 基本上低于 L_r 和 L_m 。

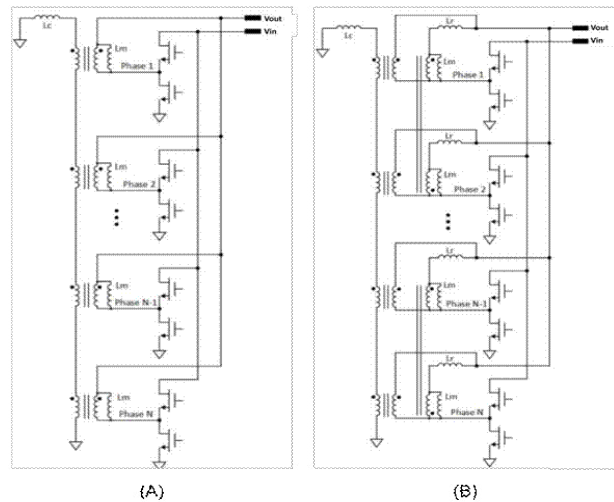


图 4: TLVR 的等效电路 (A) 单次 TLVR (B) 双级 TLVR

图 5 示出了稳态，例如，无负载瞬态，(单次) TLVR 的操作 (图 5A)。图 5B 示出了驱动每个相位的 PWM 波形。在稳态时，所有相位的 PWM 波形都是均匀交错的。图 5C 示出了每相的磁化电感 L_m 所承载的磁化电流。如图所示，磁化电流包括直流偏置电流以及开关频率下的三角形纹波电流。图 5D 示出了通过初级绕组的电流，例如，通过补偿电感器 L_c 的电流。通过补偿电感器的电流包括频率为开关频率 N 倍的纹波电流。通过补偿电感器的电流 I_{Lc} 和通过每个相位的磁化电感器的电流 $I_{Lm_1}, \dots, I_{Lm_N}$ 的涟漪彼此可比。通过初级绕组的电流 I_{Lc} 被反射到每个相的次级绕组，使得每个输出相电流，如图 5E 所示，是 I_{Lc} 和 I_{Lm_x} 的叠加，其中 x 是相数。

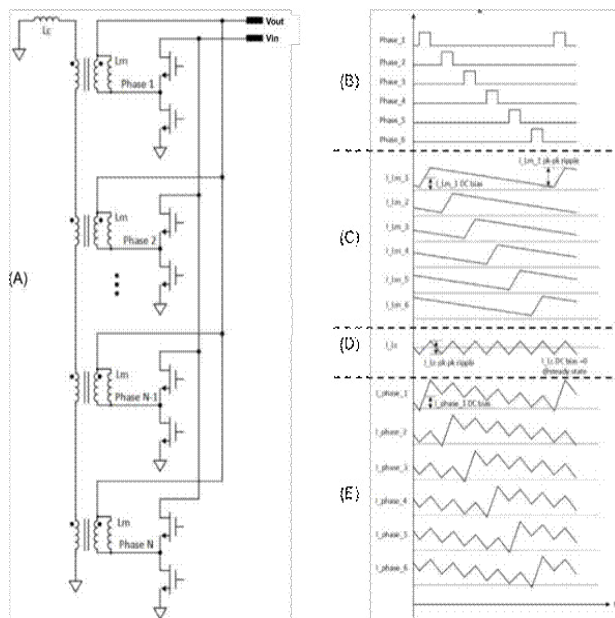


图 5: TLVR 的稳态运行。

- (A) 单个次级 TLVR (B) 驱动 PWM 波形
- (C) 电流通过每相的磁化电感 (D) 电流通过每相的初级绕组
- (E) 输出电流

图 6 示出了 (单个次级) TLVR 的瞬态操作 (图 6A)。在负载瞬态期间, 例如负载要求的电流突然增加, 驱动 PWM 波形 (未显示) 的占空比由 PWM 控制器调整。PWM 占空比的变化导致通过磁化电感器 (602) 的磁化电流 I_{Lm_x} (图 6B) 的变化, 例如表现为三角形纹波波形的更大幅度。反过来, 通过补偿电感器的电流 I_{Lc} (图 6C) 也改变 (604)。由于相电流 (图 6D) 是 I_{Lc} 和 I_{Lm_x} 的叠加, 因此所有输出相电流都经历电流变化 (606)。这导致 TLVR 的快速瞬态响应。实际上, TLVR 的等效总输出电感大大低于传统的多相 VR 实现。

图 7 示出了具有 750 kHz PWM 驱动波形、100 nH 补偿电感和 6 mF MLCC 去耦电容器的单个次级十二相 TLVR 的瞬态响应。图 7A 示出了从 100 安培到 100 安培的负载瞬态 500 安培, 每纳秒 2 安培。图 7B 示出了 TLVR 的电流输出, 其显示负载电流在 300 纳秒内被跟踪。图 7C 示出了 TLVR 的输出电压, 其显示没有实质性的电压降。

对比图 7 和图 2, 可以看出 TLVR 带宽几乎是传统多相电压调节器的五倍。

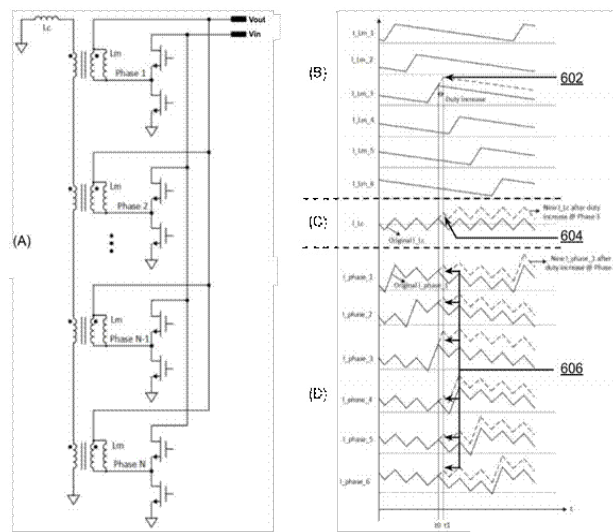


图 6: TLVR 的瞬态操作。

- (A) 单个次级 TLVR (B) 电流通过每相的磁化电感
- (C) 电流通过每相的初级绕组 (D) 输出电流

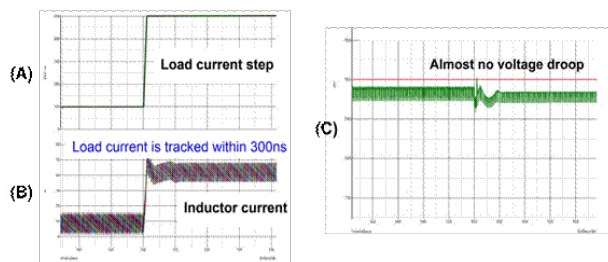


图 7: TLVR 的瞬态响应。

- (A) TLVR 的负载瞬态 (B) 电流响应
- (C) TLVR 的输出电压响应

图 8 示出了单个次级 TLVR 的示例应用, 如顶部横截面 (图 8A) 和前部 (图 8B) 视图所示。在图 8C 中, 示出了包括单个次级 TLVR 及其驱动器 MOSFET 的单个单元。如图 8A-B 所示的单个次级 TLVR 的示例尺寸为 11mm × 14mm × 10mm, 图 8C 的电池可以提供 70 A 的热设计电流, 最大为 160 A, 同时在 500 kHz 的 PWM 开关频率下将 12 V 的输入电压转换为 1.8 V 的输出电压。

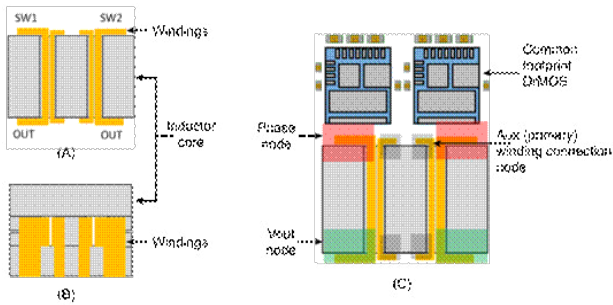


图 8：单个辅助 TLVR 的示例应用。

(A) 顶视图 (B) 前视图
(C) 单电池布局, 包括 TLVR 及其驱动器 MOSFET

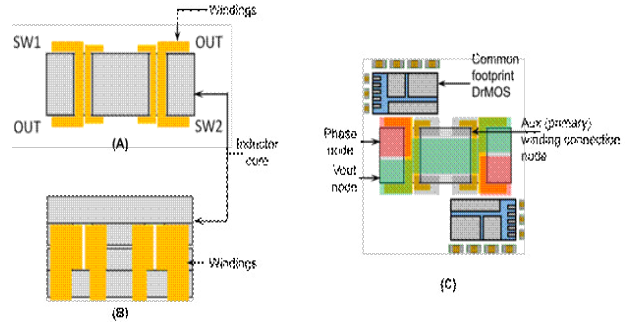


图 10：双辅助 TLVR 的示例应用。

(A) 顶视图 (B) 前视图
(C) 包含 TLVR 及其驱动器 MOSFET 的单个电池布局

图 9 示出了位于例如模块 PCB 上的八相单级 TLVR。图 9 的 TLVR 的示例尺寸为 50mm×20mm, 可提供 200 a 的热设计电流, 最大为 500 a。补偿电感器 Lc 和磁化电感器 Lm 各为 150 nH。图 9 的 TLVR 可扩展到任意数量的阶段, 并且即使在高阶段计数时也具有很少的可制造性、布局和库存单元约束。补偿电感可独立调节, 以实现瞬态性能和回路稳定性之间的最佳平衡。由于其较小的输出电感, TLVR 即使在高相位计数时, 甚至在相位计数接近 VR 降压比时, 也具有优异的瞬态响应。

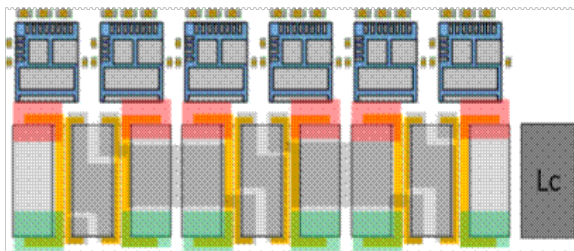


图 9：八相单级 TLVR 的布局

图 10 示出了双级 TLVR 的示例应用, 如顶部横截面 (图 10A) 和前部 (图 10B) 视图所示。在图 10C 中, 示出了包括双级 TLVR 及其驱动器 MOSFET 的单个单元。图 10A-B 所示的双级 TLVR 的示例尺寸为 6mm×13mm×7.5mm, 图 10C 的电池可以提供 70 A 的热设计电流, 最大为 120 A, 同时在 500-800 kHz 的 PWM 开关频率下将 12 V 的输入电压转换为 0.6-1.0 V 的输出电压。

图 11 示出了十二相双级 TLVR, 例如位于模块 PCB 上。图 11 的 TLVR 可以是示例尺寸 16mm×71mm, 并且可以提供 420 a 的热设计电流, 最大为 720 a。补偿电感器 Lc 为 100 nH。图 11 的 TLVR 可扩展到任意数量的阶段, 并且即使在高阶段计数时也具有很少的可制造性、布局和库存单元约束。补偿电感可独立调节, 以实现瞬态性能和回路稳定性之间的最佳平衡。由于其较小的输出电感, TLVR 即使在高相位计数时, 甚至在相位计数接近 VR 降压比时, 也具有优异的瞬态响应。

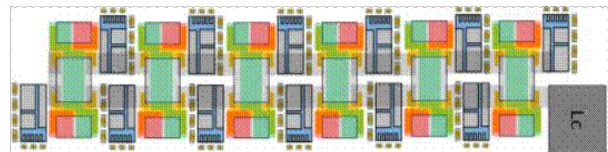


图 11：十二相双级 TLVR 的布局

结论

本文描述了一种多相变换电感电压调节器 (TLVR)。TLVR 的每相都有一个输出电感器, 该电感器是变压器的二次绕组, 其一次绕组都连接在串联回路中。相位由交错脉冲宽度调制 (PWM) 波形驱动。在负载瞬态的情况下, 调整相位 PWM 波形的占空比, 以使所有相位响应变化的电流。其结果是极快的瞬态响应, 与负载的电流强度和带宽要求相匹配。