

轨道交通车辆 24V 直流电源的节能研究

Energy-saving Study of 24V DC Power of Rail Transit Vehicles

吕龙, 刘国梁

长春轨道客车股份有限公司 (吉林, 长春, 130062)

Lv Long, Liu Guoliang

Changchun Railway Vehicles Co., Ltd (Jilin, Changchun, 130062)

摘要: 目前轨道交通车辆普遍采用的低压直流电源供电制式为 110V 和 24V, 其中 110V 直流电源集成在车载辅助供电系统中, 通过辅助供电系统将接触网上高压电变换为满足轨道交通车辆运营需求的 110V 直流电, 而 24V 直流电需采用额外的电能变换模块来获取。针对轨道交通车辆 24V 直流电源的设计, 介绍了一种基于 ZVS 软开关技术的节能控制方案, 并进行了仿真研究, 结果表明遵循该节能方案的 24V 直流电源同样取得了较好的动静态特性。

关键词: 节能 24V 直流电源 零电压开关 ZVS 硬开关 软开关

Abstract: So far, low-voltage DC power has been widely used in rail transit vehicles, including 110V and 24V. 110V DC power is integrated in the vehicle auxiliary power supply system, through which it contacts high voltage electricity from the grid, transformed into a satisfied kind of 110V DC power. While 24V DC power is got by additional electric energy. As for the design of 24V DC power of rail transit vehicles, an energy-saving control scheme based on ZVS soft switching technology is introduced, a simulation research also being done. The result shows that such a 24 DC power has a good static and dynamic performance as well.

Key words: Energy-saving, 24V DC Power, Zero voltage switch (ZVS), Hard switching, Soft switching

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 03-0034-04

0 引言

现代轨道交通车辆直流电源正向小型化、轻量化以及节能化的方向发展, 这就要求 PWM 直流稳压电源具有更高的开关频率^[1-2]。然而, 对于传统 PWM 直流稳压电源来说, 提高开关频率会面临诸多实际问题。在传统 PWM 直流稳压电源中, 功率开关管在电压不为零时导通, 在电流不为零时关断, 处于强迫开关过程, 这种开关过程又称为硬开关过程。在这种硬开关工作模式下, 随着开关频率的上升, 开关管的开关损耗会成正比地上升, 使电路的效率大大降低, 同时会产生严重的电磁干扰^[3]。针对以上问题, 本文介绍了一种基于 ZVS 软开关技术的节能型直流稳压电源设计方案, 并进行了仿真研究。

1 车载直流稳压电源节能方案分析

传统直流稳压电源通过 PWM 技术控制功率开关管的导通和关断, 其实质上是一种突变的开关过程, 提供或中断功率流, 最终实现能量的变换, 可将这种开关过程称为硬开关过

程。而 ZVS 软开关技术, 通过谐振电感与功率开关管结电容进行谐振, 当功率开关管两端电压下降到零时, 开通或关断功率器件。由于功率开关管在零电压条件下完成导通与关断, 将使开关损耗在理论上为零, 硬开关与软开关的开关过程示意图如图 1 所示。由于 ZVS 软开关过程开关损耗理论上为零, 在同等开关频率的工况下, 采用 ZVS 软开关技术的直流稳压电源将具备明显的节能效果。

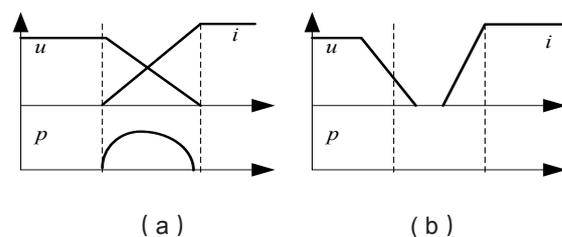


图 1 硬开关与软开关的开关过程:
(a) 硬开关过程; (b) 软开关过程

2 拓扑结构

目前,轨道交通车辆低压电子系统广泛采用的供电制式为直流 110V 和直流 24V, 110V 直流电源集成在车载辅助供电系统中, 通过对 110V 直流电的进一步变换获取直流 24V 电源^[4-5]。将 ZVS 软开关控制应用于对 24V 直流电源的设计改进中, 拓扑结构如图 2 所示, 与传统硬开关非节能电源拓扑结构相比仅增加了谐振电感 L_r 。

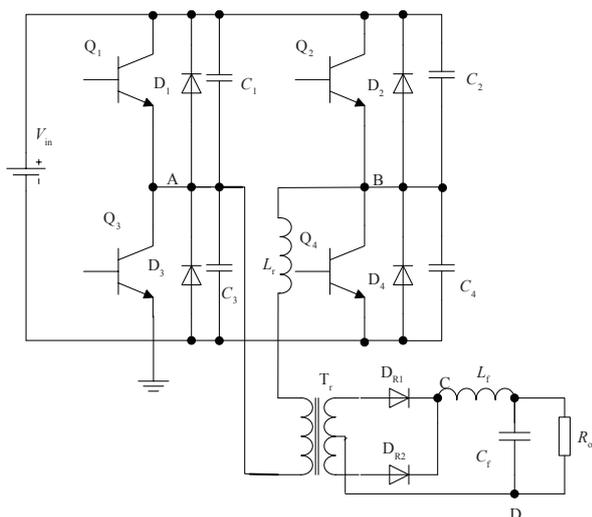


图 2 基于 ZVS 的 24V 电源拓扑结构

其中: V_{in} 为输入直流电压, $Q_1 \sim Q_4$ 为功率开关管, $C_1 \sim C_4$ 分别是 $Q_1 \sim Q_4$ 的内部结电容, $D_1 \sim D_4$ 分别是 $Q_1 \sim Q_4$ 的内部寄生二极管。 L_r 是谐振电感 (包括高频变压器的漏感和外部串联电感)。高频变压器 Tr 的原副边匝比为 k , DR_1 和 DR_2 是输出整流二极管, L_r 是输出滤波电感, C_f 是输出滤波电容, R_o 是负载。 Q_1 、 Q_3 构成超前桥臂, Q_2 、 Q_4 构成滞后桥臂, 每个桥臂的两个功率开关成 180° 互补导通, 两个桥臂的导通角相差一个相位, 即移相角, 通过调节移相角的大小可以调节输出直流电压。当输入电压 V_{in} 发生波动时, 移相角发生变化, 在 AB 两点得到幅值为 V_{in} 而占空比变化的交流方波电压, 经过高频变压器的隔离和变压后, 在变压器副边得到一个幅值为 V_{in}/k 的交流方波电压, 通过 DR_1 和 DR_2 整流后输出 24V 直流电压。

3 ZVS 控制方式分析

为实现 ZVS, 要求谐振电感 L_r 具备足够的能量来抽走将要开通的开关管结电容上的电荷, 并给同一桥臂将要关断的开关管结电容充电。超前桥臂和滞后桥臂 ZVS 控制方式如下。

超前桥臂 Q_1 、 Q_3 关断过程中, 利用开关管的结电容或并联电容两端的电压不能突变的特性, 来实现零电压关断。超前桥臂 Q_1 、 Q_3 开通过程工作原理如图 3 所示, 主要波形如图 5 所示。当超前桥臂的 Q_1 在 t_0 时刻关断后, 必须在另外一只

开关管 Q_3 的反并联二极管 D_3 导通时, 开通 Q_3 , 才是零电压开通。 Q_1 关断后到 Q_4 关断前的 $[t_0, t_1]$ 时段, 变换器工作在 0 状态。为了实现超前桥臂的 ZVS, 0 状态为恒流模式, 即原边电流保持恒定。在 0 状态中, 原边电流一直流过 D_3 , 如图 3 所示。即使开通 Q_3 , 也不会流过电流。因此, Q_3 的开通时刻可以在 $[t_0, t_1]$ 时段的任何时刻。

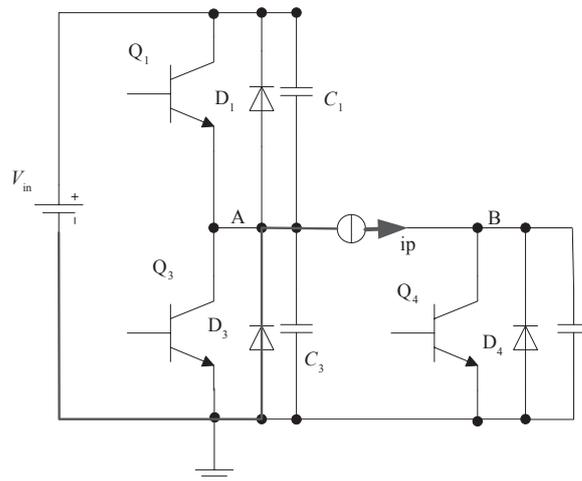


图 3 超前桥臂 ZVS 示意图

同样, 滞后桥臂的关断过程也利用开关管的结电容或并联电容两端电压不能突变的特性, 实现零电压关断。超前桥臂 Q_2 、 Q_4 的开通过程工作原理如图 4 所示, 主要波形如图 5 所示。在 t_0 之前, Q_1 和 Q_4 导通, 原边电流 i_p 流经 Q_1 和 Q_4 。在 t_0 时刻, 超前桥臂开关管 Q_1 零电压关断后, Q_3 的反并联二极管 D_3 导通, 变换器工作在 0 状态, 即 $V_{AB}=0$, i_p 流经 D_3 和 Q_4 。延迟一段时间后, 如在 $[t_0, t_1]$ 时段中的 t_x 关断滞后桥臂的开关管 Q_4 , i_p 就会给 C_4 充电, 同时给 C_2 放电。当 C_4 的电压上升到 V_{in} 时, Q_2 的反并联二极管 D_2 导通, 此时 $V_{AB} = -V_{in}$, i_p 流经 D_3 和 D_2 , 变换器出现状态切换。此后原边电流 i_p 开始减小, 并且减小到零, 如图 3 所示。如果不在 i_p 减小到零之前开通 Q_2 , C_4 就会开始放电, 同时 C_2 开始充电, 使 Q_2 失去零电压开通条件。 i_p 减小到零的时间与负载有关, 负载越小, i_p 减小到零的时间越短, 可能出现在 t_1 之前。而 Q_2 只能在 t_1 时刻开通, 为了在任意负载下, Q_2 能够在 t_1 时刻实现零电压开通, Q_4 的关断时间必须向后延迟 t_1 时刻。因此, 滞后桥臂只能将其开通时间向后增加到 $T_r/2$, 如图 5 所示。

4 仿真分析

在 Psim 仿真环境下搭建仿真模型, 如图 6 所示。其中: 输入电压模拟实际轨道交通车辆辅助供电系统的 110V 直流输出, 功率开关管采用金属氧化物场效应管 MOSFET, 结电容为 $C=1\mu\text{F}$; 谐振电感 $L_r=200\mu\text{H}$; 变压器变比 31:10; 滤波电感 $L_r=40\mu\text{H}$; 滤波电容 $C_f=10\mu\text{F}$; 由于直流电源对电感负载相

当于短路，因此选取纯电阻负载，选取 $R_0=50\Omega$ ；PWM 控制器采用平均电流模式控制算法，将电路的输出电压和电流反馈会控制系统，通过闭环 PWM 控制器控制功率开关管开通和关断，开关频率为 50kHz。

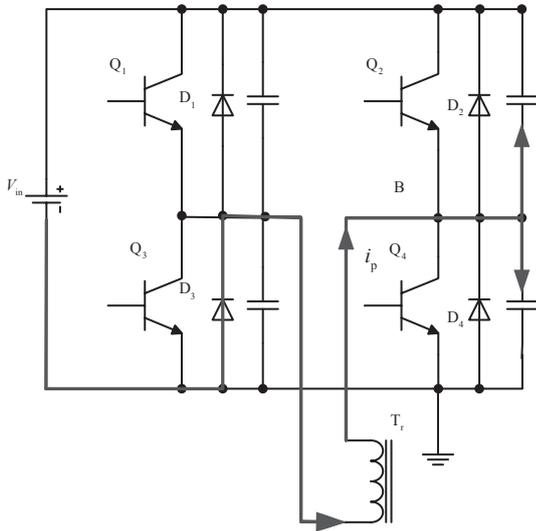


图 4 滞后桥臂 ZVS 示意图

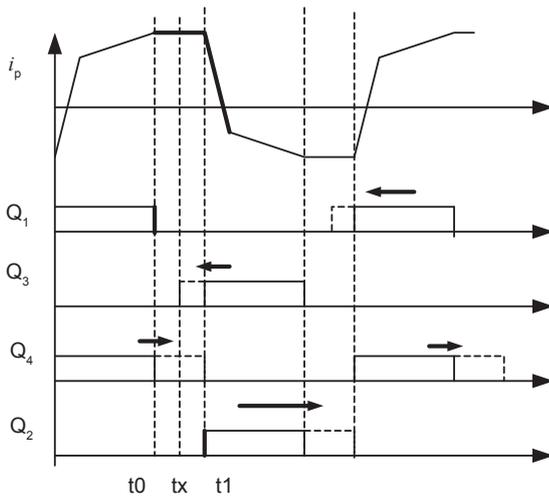


图 5 ZVS 方式主要波形

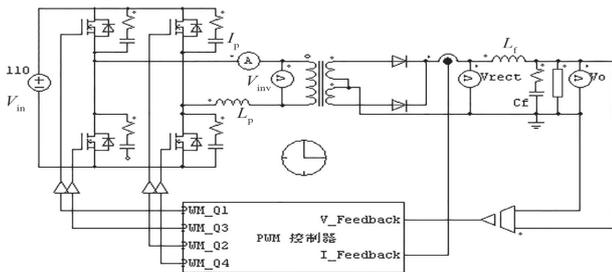


图 6 仿真模型

基于以上仿真模型，获得的各开关器件开通时序及变压器原边电流 i_p 波形如图 7 所示。为检验 24V 电源性能，测试

电源输出电压波形如图 8 所示，将输出电压性能指标列入表 1。

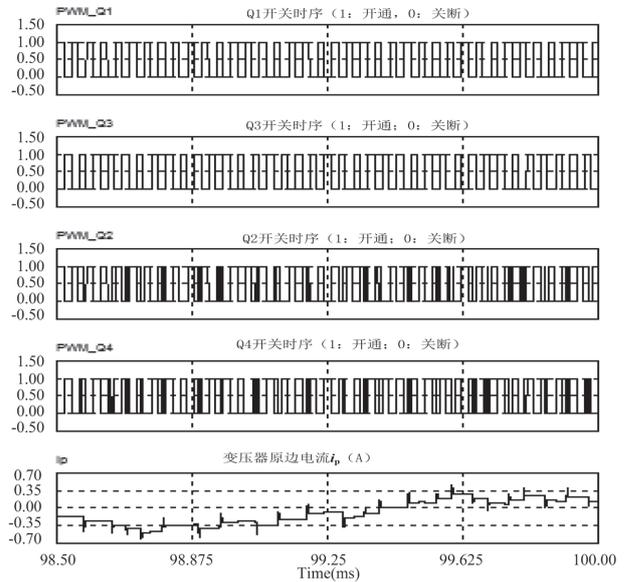


图 7 仿真波形

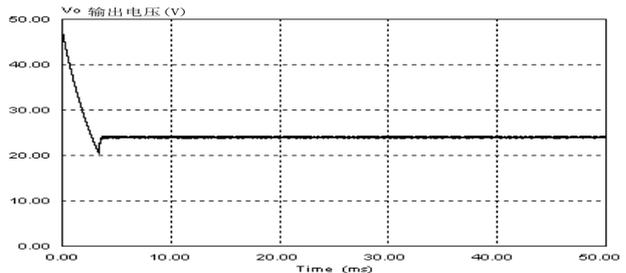


图 8 输出电压波形

表 1 主要性能指标

输出功率 (W)	11.52
调节时间 (ms)	3.5
超调量 (%)	79.58%
电压波动范围 (V)	21.35~43.10
稳态电压脉动范围 (V)	23.80~24.27

可见该电源无论在动态调节时间还是在输出稳态精度方面，均可满足轨道交通车辆 24V 直流供电需求。

5 结论

24V 直流电源在轨道交通车辆低压供电系统中占据不可或缺的位置，主要为刮雨器、仪表灯及电笛等电子设备提供电能。在实际设计中，如果要实现 ZVS 节能型直流电源，在硬件电路方面仅需增加谐振电感，在软件层面需考虑合适的 ZVS 控制方式，通过 PWM 控制器适时地开通和关断功率开关管，由此可见这种节能型电源设计方案对成本增加的贡献非常微小。本文在仿真平台上搭建仿真模型，进行电源的模拟设计，设计出的电源具有良好的动态调节时间和稳态输出精度，为轨
(上接第 45 页)