

炮控系统双向DC/DC变换器的仿真研究

李敏裕，马晓军，闫之峰，袁东

装甲兵工程学院控制工程系，北京 310027

摘要：为吸收坦克火炮减速或制动时产生的回馈电能，提出采用双向DC/DC变换器代替单向升压电源的解决方案。通过灵活切换双向DC/DC变换器的工作模式以满足炮塔不同工况下的能量转换需求。根据所选定的拓扑结构建立了基于simulink的双向DC/DC变换器闭环系统模型，仿真结果表明模型实现了升压和降压两种工作模式，并平稳地完成了两种工作模式的切换，变换器具有良好的稳态特性和动态特性，为下一步样机的研制打下了良好的基础。

关键词：炮控系统，双向 DC/DC 变换器，仿真

1 引言

双向 DC/DC 变换器能够实现两种不同电压等级直流电源之间的能量双向传输，广泛应用于直流不停电电源系统、航天电源系统、电动汽车及蓄电池能量储备系统等领域^[1]。目前，坦克中的 24V 直流电通过升压变换装置升高到 270V 直流电供炮控系统使用^[2]，而坦克火炮减速或者制动时，储存在电动机及其所带负载转动部分的动能都将变成电能回馈给直流电源，如果直流电源是不可控的整流器供电电源，不可能回馈电能，只好对滤波电容器充电而使电源电压升高，称为“泵升电压”。如果要让电容器全部吸收回馈能量，将需要很大的容量，或者泵升电压会升的很高而损坏元器件，传统的单向升压电源无法释放“泵升电压”^[3]，而双向 DC/DC 变换器能够较好地解决这个问题，在炮塔工作时，它将 24V 直流电升高到 270V 直流电供炮控系统使用，炮塔减速或者制动时，通过将 270V 直流电降到 24V 直流电以释放泵生电压并回收能量。

本文将通过合理选取双向 DC/DC 变换器拓扑结构，简要分析其工作原理，建立仿真模型，分析模型在炮控系统不同工作模式下的工作情况，为下一步样机的研制提供依据和指导。

2 主电路拓扑结构选取及其模型建立

2.1 主电路拓扑结构选取

坦克炮控系统双向 DC/DC 变换器需要实现 24V 直流电与 270V 直流电之间的双向变换，转换功率 3kW，需

要采用隔离型大功率的拓扑结构。文献 [4] 提出的双全桥隔离型双向 DC/DC 变换器主拓扑结构（如图 1 所示）符合本文要求，并能够通过控制实现软开关，提高双向 DC/DC 变换器的转换效率，减小电磁干扰，因此本文选择该拓扑结构为主电路拓扑结构。

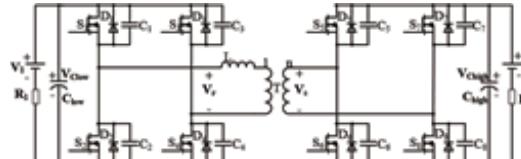


图 1 双向 DC/DC 变换器拓扑结构

2.2 主电路工作原理简要分析

图 2 为双向 DC/DC 变换器工作于升压模式时的理论波形，低压侧 V_1 为 24V 直流电源，高压侧 V_2 为输出电压， $S_1 \sim S_8$ 分别为相应开关管的驱动信号， V_r 和 V_s 为变压器原边和副边的波形， I_L 为电感电流 L 的波形。 $S_1 \sim S_8$ 均工作于开关状态， S_1 和 S_4 、 S_2 和 S_3 、 S_5 和 S_8 、 S_6 和 S_7 分别同时开通关断， S_1 和 S_2 、 S_3 和 S_4 、 S_5 和 S_6 、 S_7 和 S_8 分别互补开通关断， S_1 开通时间超前 S_5 一个移相角 φ ，通过反馈控制调整 φ 的大小便可稳定输出电压 V_2 。双向 DC/DC 变换器拓扑结构左右对称，因此降压模式工作原理和升压模式工作原理一致，此时，高压侧 V_2 为 270V 直流电源，低压侧 V_1 为输出电压， S_1 开通时间滞后 S_5 一个移相角 φ ，同样通过反馈控制调整 φ 的大小便可稳定输出电压 V_1 。

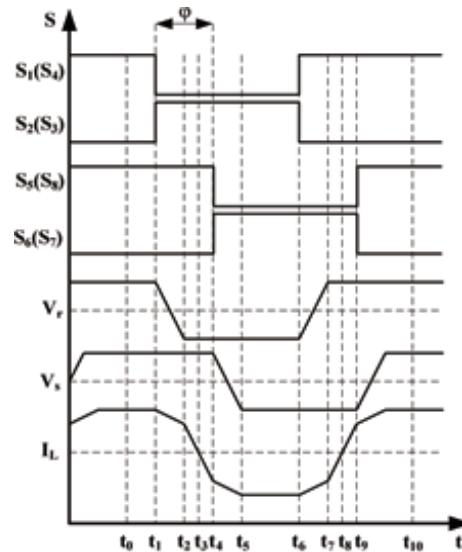


图 2 双向 DC/DC 变换器理论波形

2.3 双向 DC/DC 变换器系统建模

双向 DC/DC 变换器是强非线性开关电路，其动态特性解析解的分析方法十分复杂^[5]，传统的解析建模方法不直观，过程复杂，耗费时间长，而数字仿真法直观，操作简便，仿真快速，模型精度也较高，因此，本文将基于 MATLAB 的 simulink 平台完成对双向 DC/DC 变换器系统的主电路、移相式 PWM 发生电路、闭环控制器的建模。

如图 3 所示为基于 simulink 的双向 DC/DC 变换器模型，其中包括升压控制器、降压控制器、移相式 PWM 发生模块、主电路。升压和降压控制器模块用于完成闭环控制量的运算，该控制量输入到移相式 PWM 发生模块改变 PWM 信号之间的移相角 φ ，进而实现对输出电压的闭环控制。模型工作模式的切换通过 Timer 模块、SW 开关模块及 CV 受控电压源模块实现，通过 Timer 模块设定升压、降压模式的工作时间以及切换的时间点，Timer 模块的输出直接控制相应的 SW 模块及 CV 模块实现控制器、

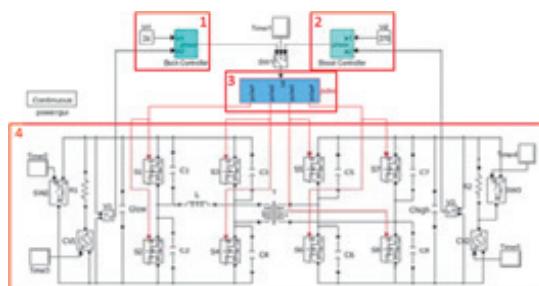


图 3 双向 DC/DC 变换器模型

电源及负载的切换，从而实现在指定时间点切换工作模式的目标。

3 仿真分析

为简化模型，便于分析，在 2.3 所建模型中的所有开关管、二极管都是理想开关器件，忽略变压器绕组及线路中的电阻，低压侧直流电源 $V_1=24V$ ，负载 $R_1=0.192\Omega$ ，高压侧直流电源 $V_2=270V$ ，负载 $R_2=24.3\Omega$ ，电感 $L=0.5\mu H$ ，变压器变比 $n=1:11$ ，低压侧滤波电容 $C_{low}=3000\mu F$ ，高压侧滤波电容 $C_{high}=200\mu F$ ，开关管缓冲电容 $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=C_7=C_8=C_9=C_{10}=0.1\mu F$ ，升压控制器中比例系数 $P=5 \times 10^{-7}$ ，积分系数 $I=5 \times 10^{-4}$ ，降压控制器中比例系数 $P=8 \times 10^{-7}$ ，积分系数 $I=1.1 \times 10^{-2}$ 。

双向 DC/DC 变换器运行时主要有三种工作模式：升压模式、升降压切换模式、降压模式。仿真模型中，设定在 0~0.01s 时间内双向 DC/DC 变换器工作于升压模式，在 0.01s 开始切换到降压模式，0.01s~0.015s 时间内双向 DC/DC 变换器工作于降压模式，整个工作过程的仿真波形如图 4~8 所示。

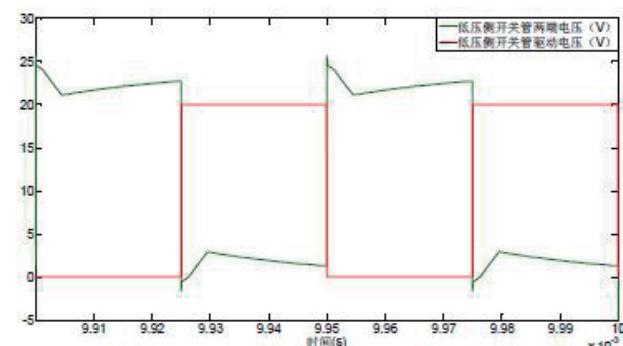


图 4 低压侧开关管波形

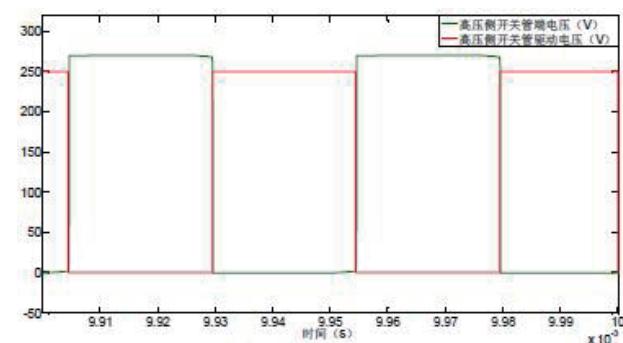


图 5 高压侧开关管波形

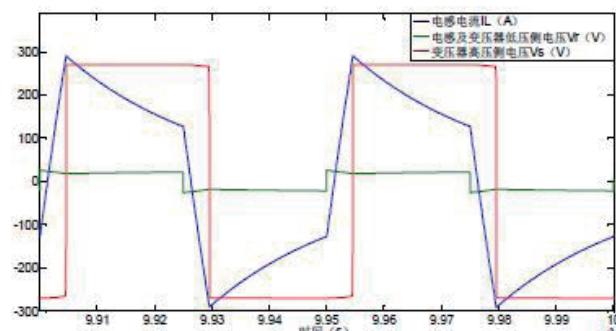


图 6 变压器波形

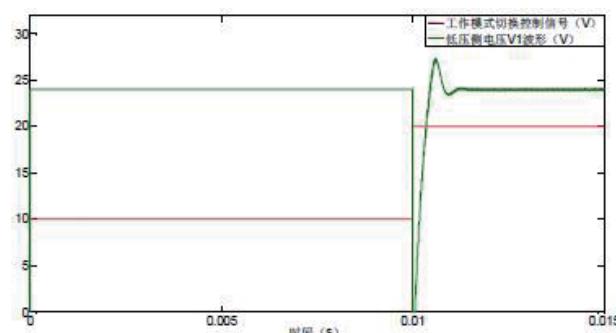


图 7 低压侧电压波形

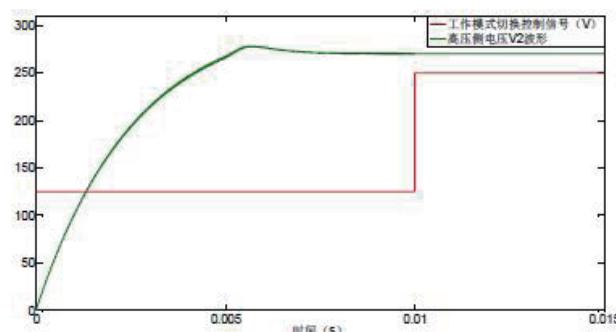


图 8 高压侧电压波形

图 4 与图 5 分别为高压、低压侧开关管的波形，低压侧开关管实现了零电压开通，高压侧开关管实现了零电压关断，图 6 为变压器原副边波形，与图 2 的理论分析波形一致，变换器工作原理理论分析得到验证。

关断，图 6 为变压器原副边波形，与图 2 的理论分析波形一致，变换器工作原理理论分析得到验证。

图 7 和图 8 分别为变换器低压侧和高压侧电压波形，当工作模式切换信号为低电平时，变换器工作于升压模式，当工作模式切换信号为高电平时，变换器工作于降压模式。由图可见，在 0~0.01s 时间内变换器工作于升压模式时，变换器调节过程超调量小，稳态精度高；在 0.01s 时，变换器开始切换工作模式，切换过程平稳、迅速，经过微小时间延迟后，变换器迅速工作在降压模式，低压侧电压经过调整迅速稳定在 24V。仿真结果表明，所建立的双向 DC/DC 变换器模型具有良好的动态、稳态性能。

4 结论

为解决炮控系统中炮塔制动时产生的回馈电能难以有效吸收的问题，提出采用双向 DC/DC 变换器代替传统的单向升压电源实现能量的双向传输以消除泵生电压的影响，选取了主电路拓扑结构，以该拓扑结构为基础在 simulink 中建立了双向 DC/DC 变换器系统的闭环模型，仿真结果表明，该双向 DC/DC 变换器能够很好地实现能量双向传输，双向工作模式切换过程迅速、平稳，具有良好的稳态和动态性能，为下一步样机的研制打下了良好的基础。

参考文献

- [1] 金波. 基于软开关的大功率双向 DC/DC 变换器的研究 [D]. 合肥：合肥工业大学，2004.
- [2] 徐航. 全电式炮控系统研究现状及发展探讨 [A]. 全电战斗车辆发展趋势及关键技术 [C]. 北京，2010：333-334.
- [3] 藏克茂，马晓军，李长兵. 现代坦克炮控系统 [M]. 北京：国防工业出版社，2007.
- [4] 许海平. 大功率双向 DC/DC 变换器拓扑结构及其分析理论研究 [D]. 北京：中科院电工所，2005.
- [5] 侯文晶. DC-DC 开关变换器建模方法的研究与仿真分析 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.