



·高功率脉冲电源技术及应用·

多级 XRAM 型脉冲功率电源开关器件简化研究*

张玉宸^{1,2}, 戴玲^{1,2}, 樊晟廷^{1,2}, 冯永杰^{1,2}, 林福昌^{1,2}

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074; 2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 电磁发射的能力主要取决于脉冲功率电源系统, 脉冲功率电源的优化是电磁发射技术取得进一步突破的关键技术之一。电感储能型脉冲功率电源在能量密度方面有很大优势, 具备深远的发展潜力。基于串联充电和并联放电的 XRAM 型脉冲功率电源具有结构简单、可扩展性强的优点。分析了多级 XRAM 电源拓扑结构中二极管器件的工作原理, 按照功能分类, 提出了简化二极管器件数量的方案。建立了基于 ICCOS 的 30 级 XRAM 型脉冲功率电源带轨道炮负载的仿真模型, 每 5 级为一个电源模块, 系统总储能为 365 kJ, 发射效率近 20%。通过对比简化前后模型性能指标的仿真结果, 证明了简化第一级的下臂二极管不利于多级电源的运行。简化多级拓扑中的最后一级逆流电容串联二极管, 以及在优化逆流电容参数的前提下简化充电晶闸管的反并二极管, 对电源模块的放电电流没有明显影响。

关键词: 电磁发射; 电感储能; XRAM; 二极管; 模块化

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230211

Research on switching devices simplification of multistage XRAM pulse power supply

Zhang Yuchen^{1,2}, Dai Ling^{1,2}, Fan Shengting^{1,2}, Feng Yongjie^{1,2}, Lin Fuchang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The ability of electromagnetic emission mainly depends on the pulse power supply system, and the optimization of pulse power supply is one of the key technologies to make further breakthroughs in electromagnetic emission technology. Inductive energy storage type pulse power supply has great advantages in energy density and has far-reaching development potential. The XRAM pulse power supply based on series charging and parallel discharge has the advantages of simple structure and strong expandability. In this paper, the working principle of diode devices in multilevel XRAM power supply topology is analyzed, and a scheme is proposed to simplify the number of diode devices based on function classification. A simulation model is established for a 30-stage XRAM pulse power supply with a railgun load using ICCOS. Each power module consists of five stages, resulting in a total energy storage capacity of 365 kJ for the system, with an emission efficiency of nearly 20%. By comparing the simulation results of model performance indexes before and after simplification, it is proved that the simplified lower arm diode of the first stage is unfavorable to the operation of the multistage power supply. Simplifying the final countercurrent capacitor series diode in the multistage topology, and the antiparallel diode of charging thyristor under the premise of optimizing the countercurrent capacitor parameters, have no obvious effect on the discharge current of the power module.

Key words: electromagnetic launching, inductive pulsed power supply, XRAM, diode, modularization

电磁发射能力与脉冲功率电源系统密切相关, 脉冲功率电源所需的空间大小限制了整个发射装置的机动作战能力。电磁发射技术在国防科技领域进一步突破, 需要攻克的关键技术之一是脉冲功率电源的总体积小型化^[1-3]。电感储能型脉冲功率电源在能量密度上有较大优势, 在脉冲功率电源领域有较大的发展潜力^[4]。目前, 电感储能型脉冲功率电源拓扑可大致分为类 Meat Grinder 拓扑、类 XRAM 拓扑以及它们的衍生拓扑。XRAM 拓扑具有电流

* 收稿日期: 2023-07-08; 修订日期: 2023-09-13

联系方式: 张玉宸, M202172000@hust.edu.cn。

通信作者: 戴玲, dailing@mail.hust.edu.cn。

放大倍数高、可拓展性好的特点,是电感储能型脉冲功率电源的主流方案之一^[5-7]。由于在关断大电流时电流的突变,电感储能型脉冲功率电源的主开关在关断时会承受很高的电压,所以可靠关断大电流是电感储能型脉冲功率电源的技术难点。德法联合研究所(ISL)提出了应用 ICCOS 换流技术的 XRAM 拓扑,并在不同电源级数及电流条件下进行了实验^[8-12]。在最新的研究中,ISL 研制了基于该拓扑的 1 MJ 电感储能型脉冲功率电源,并进行了带轨道炮的试验,成功利用 ICCOS 换流技术切断了 40 kA 的充电电流,将 80 g 的弹丸加速到了 1120 m/s^[13]。清华大学于歆杰团队在进一步研究中发现,在各换流回路上串联二极管,可使各级逆流电容完全与充电回路隔离,实现充电回路与负载放电回路的解耦^[14]。在此基础上,对于一个 n 级的带 ICCOS 换流回路的 XRAM 拓扑,理论上需要 $4n$ 个二极管以及 $n+1$ 个晶闸管,开关器件数量较多,不利于实现电源模块的小型化设计。本文简述了多级 XRAM 电源拓扑的工作原理,分析了各级电感放电回路中 4 类二极管的主要作用,并通过在 Simulink 中搭建多级 XRAM 型脉冲电源带轨道炮仿真模型,验证了去除最后一级逆流电容串联二极管,以及在优化逆流电容参数的前提下去除充电晶闸管的反并二极管的可行性。

1 多级 XRAM 电源拓扑分析

XRAM 电流倍增原理与 MARX 电压倍增原理对偶, ICCOS 换流回路的功能是关断各级充电晶闸管。

1.1 工作原理

带 ICCOS 的多级 XRAM 拓扑如图 1 所示。XRAM 电源采用“串充并放”的工作方式,即各级电感由串联充电转换为并联放电,从而在负载上获得急剧上升的脉冲电流,其幅值理论上为各电感电流之和。具体而言,带 ICCOS 的多级 XRAM 拓扑正常工作时可以分为三个主要阶段。

(1) 充电阶段:各级充电晶闸管 $T_1 \sim T_n$ 同时触发,初级电源 U_s 给各级储能电感 $L_1 \sim L_n$ 串联充电,电感电流达到一定值后,触发负载晶闸管 T_0 导通,进入逆流阶段;

(2) 逆流阶段:每级逆流电容器上均有预充电压。负载晶闸管 T_0 触发后,逆流电容器 $C_1 \sim C_n$ 上的预充能量通过初级电源——负载支路释放,具体来说: $C_1-T_1-U_s-D_{n2}$ -负载- T_0 构成第一级逆流电容的放电回路, $C_k-T_k-D_{(n-1)2}$ -负载- T_0 ($k=2 \sim n$) 构成其余各级放电回路。开始放电后,逆流电容器放电电流增加,当电流上升至与充电回路电流相等时,充电晶闸管 $T_1 \sim T_n$ 电流降为 0,并在持续一段时间后被可靠关断。逆流电容器继续通过与充电晶闸管反并联的二极管对负载放电。对于第一级逆流电容放电回路,二极管 D_1 因电容器电压下降到小于直流源 U_s 的电压后被关断,二极管 D_{11} 开始导通。其余各级逆流电容器放电直至电压降为 0,二极管 $D_{21} \sim D_{n1}$ 导通,进入最后的电感放电阶段;

(3) 放电阶段:储能电感并联对负载放电,放电回路为 L_n-D_{n2} -负载- $T_0-D_{n3}-D_{n1}$,直至负载电流降为零或弹丸出膛。

1.2 二极管功能分析

图 1 拓扑中包含电感充电回路和电感放电回路。电感充电回路中的二极管 $D_1 \sim D_n$,与充电晶闸管 $T_1 \sim T_n$ 反并联,在逆流阶段为逆流电容续流,维持逆流电容对负载的放电回路,并降低充电晶闸管上的反向电压。电感放电回路二极管由逆流电容串联二极管 $D_{13} \sim D_{n3}$ 、下臂二极管 $D_{12} \sim D_{n2}$ 以及上臂二极管 $D_{11} \sim D_{n1}$ 组成。前两者相互配合,共同作用是保证充电电流只经过各级储能电感,同时逆流电容上不产生纹波电压。若去除两者,将会引起各级逆流电容与储能电感之间的电压振荡。

以第一级和最后一级储能电感的充放电回路为例。在充电过程中,充电主电源 U_s 通过 $U_s-T_1-L_1-T_2-L_2-\dots-T_n-L_n-U_s$ 对各级储能电感同步充电。分析第一级和最后一级储能电感的逆流电容所在支路,如图 2 所示:在充电过程中,各级储能电感上的电流增大,储能电感两端电压与充电电流为关联方向。假设放电回路二极管 D_{13} 、 D_{n3} 以及 D_{12} 、 D_{n2} 均不存在,不计充电晶闸管 $T_1 \sim T_n$ 的导通压降。取接地点为零电势点,由于储能电感端电压的存在,第一级逆流电容低压侧电势 φ_a 与最后一级逆流电容低压侧电势 φ_b 不再相等,各级逆流电容间将产生充放电电流。此时两级逆流电容与各级储能电感将形成 RLC 二阶回路,导致逆流电容上的电压振荡。

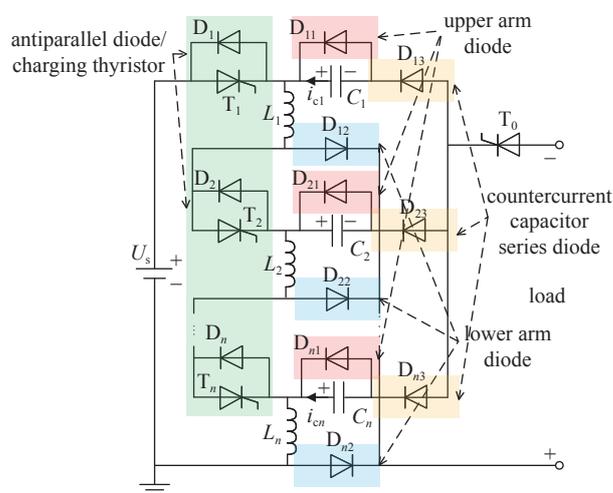


Fig. 1 Multilevel XRAM power topology with ICCOS

图 1 带 ICCOS 的多级 XRAM 电源拓扑图

$$\varphi_a = nU_L - U_C, \quad \varphi_b = U_L - U_C < \varphi_a \quad (1)$$

若回路电阻较大, 或充电过程较长, 逆流电容上的预充电电压将明显下降, 并且在触发负载晶闸管时, 各级逆流电容的剩余电压值大小不同。充电过程中各级逆流电容上的电压 $U_{ccn}(n=1\sim 4)$ 如图 3 所示, 各级逆流电容的电压波动 $> 1 \text{ kV}$ 。若不提高逆流电容的预充电电压, 必然导致某级的逆流阶段中逆流电流较小, 不足以关断充电回路晶闸管, 影响电源的正常工作, 损害电源系统。

下臂二极管 $D_{12}\sim D_{n2}$, 可配合 $D_{13}\sim D_{n3}$ 完成负载电流的续流, 还能够避免充电过程中储能电感被短路。以图 2 为例, 若取消 $D_{12}\sim D_{n2}$, 初级电源 U_s 将直接给储能电感 L_1 充电, 其余各级 $L_2\sim L_n$ 均被短路, 也会影响电源的正常运行。上臂二极管 $D_{11}\sim D_{n1}$ 则承担逆流电容能量耗尽后的负载电

流续流功能。

1.3 二极管数量简化

在图 2 所示回路中, 为阻止振荡过程的发生, 需要在各级逆流支路上串联二极管, 即逆流电容串联二极管 $D_{13}\sim D_{n3}$ 。根据上述分析, 由于 $\varphi_a > \varphi_b$, 即 b 点电势在各级逆流电容低压侧中最低, 因此各级逆流电容间的第一个振荡电流半波的方向是由 a 点到 b 点, 所以逆流电容串联二极管最主要的作用是阻止该电流的产生, 可考虑去除最后一级逆流电容串联二极管 D_{n3} , 可以在保证逆流电容电压平稳的同时, 减少器件数量。

同理, 对于下臂二极管 $D_{12}\sim D_{n2}$, 为了避免初级电源 U_s 仅向第一级储能电感充电, 需要在之后各级储能电感的放电回路中串联下臂二极管 $D_{22}\sim D_{n2}$ 。理论上, 仅第一级下臂二极管 D_{12} 可以省去, 不会对其他各级储能电感造成影响, 而上臂二极管 $D_{11}\sim D_{n1}$ 则不可或缺。但是由于储能电感充电过程以及逆流过程中, 回路中各点电位抬升等可能会产生意外的振荡回路, 因此需要参考仿真结果做分析。

反并二极管 $D_1\sim D_n$ 的存在可以避免逆流过程中, 充电晶闸管承受较大的反向电压。但是反向电压的大小本质上也与各级逆流电容剩余电压, 以及初级电源剩余电压有关, 因此需要进一步分析其存在意义。

2 Simulink 仿真模型设计

2.1 物理模型分析

多级 XRAM 型脉冲功率电源的物理模型除电路拓扑外, 还需设计轨道炮负载模型。在简化计算时, 轨道炮负载模型可借助图 4 所示的等效电路辅助分析。

根据基尔霍夫定律, 电路方程可用微分方程描述为

$$u_L = L_r \frac{di_L}{dt} + i_L \frac{dL_r}{dt} + i_L R_r \quad (2)$$

$$R_r = R_0 + R_r'x + R_v, \quad L_r = L_0 + L_r'x \quad (3)$$

式中: R_r 和 L_r 分别代表轨道的等效电阻和等效电感, R_0 和 L_0 分别代表轨道的初始电阻和初始电感, R_r' 和 L_r' 分别代表轨道的单位电阻梯度和单位电感梯度, R_v 为表征速度趋肤效应的等效电阻, 与弹丸速度有关^[15-16], 表达式为

$$R_v = R_{vc}v^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

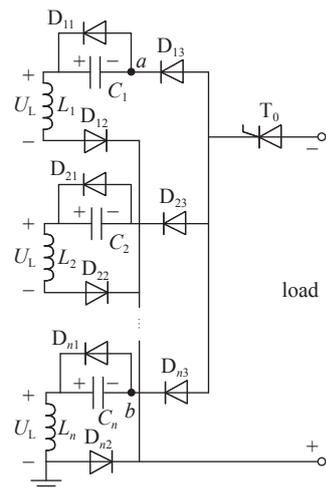


Fig. 2 Schematic diagram of inductor-counter-current capacitor loop
图 2 电感充电过程中电感-逆流电容回路示意图

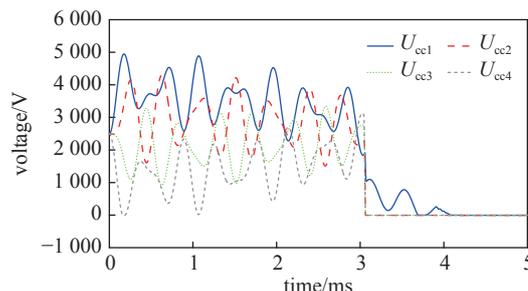


Fig. 3 Voltage waveform of counter-current capacitor after removing series diode of counter-current capacitor

图 3 去除逆流电容串联二极管后各级逆流电容电压波形

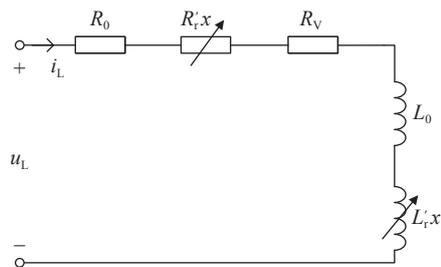


Fig. 4 Equivalent circuit of railgun load

图 4 轨道炮负载等效电路

式中: R_{VC} 为速度趋肤效应接触电阻常数, v 为电枢速度。根据上述等效电路方法, 可将轨道炮负载与电源拓扑联合建立电路模型, 为分析和仿真轨道炮的动力学过程提供基础。

2.2 动力学模型搭建

电磁轨道炮发射过程中, 由于洛伦兹力的作用, 电枢在导轨电流的强磁场下受电磁力沿轨道前进。此外, 电枢还会受到导轨作用的滑动摩擦力和空气阻力的影响。根据牛顿第二定律, 负载的运动学方程可表述为

$$F_d - F_{f1} - F_{f2} = ma \quad (5)$$

式中: F_d 、 F_{f1} 和 F_{f2} 分别为弹丸所受的电磁力、导轨摩擦力和空气阻力; m 、 a 为电枢和弹丸的总质量和加速度。具体表达式为

$$F_d = \frac{1}{2} L_r' I^2, \quad F_{f1} = \mu_f F_n, \quad F_{f2} = \frac{1}{2} C_0 \rho S v^2 \quad (6)$$

式中: ρ 为空气密度, S 为迎风面积, v 为电枢与空气的相对速度, C_0 为空气阻力系数, μ_f 为电枢与导轨之间的滑动摩擦系数, 是电枢速度的函数^[17], 表达式为

$$\mu_f = (\mu_n - \mu_g) e^{-cv} + \mu_g \quad (7)$$

式中: μ_n 为电枢与导轨之间的静摩擦系数, μ_g 为电枢与导轨之间动摩擦系数的极限值, c 为常数。

电枢与导轨之间的压力 F_n 可表示为^[17]

$$F_n = \frac{k_1 S_c}{2A} F_d \quad (8)$$

式中: k_1 为轴向应力引起的径向应力与轴向应力的比率, S_c 为电枢与导轨的接触面积, A 为弹丸截面积。

Simulink 是 Matlab 软件平台中的一种模型仿真工具, 具有适用领域广、计算效率高、修改灵活、结果可视等优点, 仿真结果更可在 Matlab 中做进一步处理, 便于分析电磁轨道炮的负载电流、脉冲功率电源的工作过程等。在 Simulink 软件平台上搭建多级 XRAM 型脉冲功率电源带轨道炮负载的电路模型和动力学模型, 电源部分为纯电路模型, 按照图 1 所示拓扑搭建。动力学模型即轨道炮负载模型, 采用理想电路元件与数学计算模型联合的形式, 将轨道炮负载等效为导轨初始阻抗 (R_0 与 L_0) 和受控电压源 u_L 的串联。轨道炮负载模型的计算框图如图 5 所示。

2.3 模块化处理

在 Simulink 中搭建一个总级数为 30 的 XRAM 脉冲功率电源轨道炮系统模型。在充电电流保持不变的条件下, 由于级数的增加, 初级电源所需能量更大, 即要求初级电源具有更高的电压, 电容器的预充电电压也随之提升, 导致逆流过程中负载将承受更大电压。

针对以上问题, 可以将多级电源模块化处理^[18]。电源模块化的基本思路是以 n 级 XRAM 电源为一个基本模块, 再使用 N 个完全相同的电源模块对负载并联放电, 从而构建总电源级数为 nN 的 XRAM 电源系统。由于 n 的取值可以很小, 因此每个电源模块中初级电源 U_s 的电压不至于过高, 逆流电容预充电电压可随之降低, 减小了逆流过程中的负载电压。

将 30 级 XRAM 电源分为 6 个模块, 每个模块为 5 级 XRAM 电源单元, 逆流电容器能量已进行优化。电源主要电气参数及轨道参数选取如表 1 所示。

3 主要指标分析

3.1 仿真结果

在表 1 参数所示仿真模型的基础上, 设置充电时间为

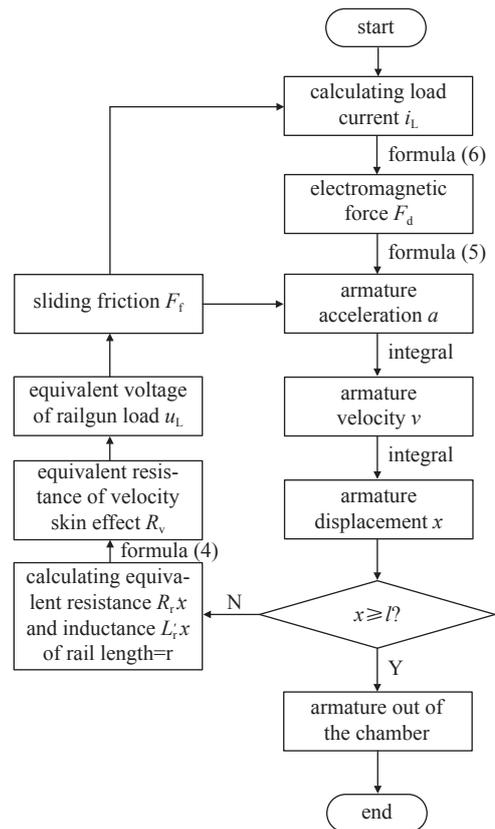


Fig. 5 Calculation block diagram of railgun load model

图 5 轨道炮负载模型计算框图

表 1 系统仿真参数选取

Table 1 Selection of system simulation parameters

symbol	quantity	value
U_s	voltage of single module charging capacitor	2440 V
L_s	single stage energy storage inductance	75 μ H
R_s	single stage energy storage resistance	3 m Ω
C	countercurrent capacitance	100 μ H
U_C	recharge voltage of countercurrent capacitor	3500 V
L_0	initial rail inductance	0.1 μ H
R_0	initial rail resistance	0.1 m Ω
L_r'	rail inductance gradient	0.5 μ H/m
R_r'	rail resistance gradient	0.1 m Ω /m
R_{VC}	velocity skin effect contact resistance constant	$10^{-8} \Omega/(\text{m/s})^{-2.3}$
μ_h	static friction coefficient	0.05
μ_g	limit value of dynamic friction coefficient	0.45
c	formula constant of sliding friction coefficient	0.03
S_c	contact area between armature and rail	$5.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
A	cross-sectional area of projectile	$6.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
k_1	ratio of radial stress to axial stress	0.025
ρ	density of dry air	1.293 g/L
C_0	air drag coefficient	0.5

4.57 ms, 充电电流为 18 kA, 导轨长度为 3 m。仿真得到的负载电流 I 波形、弹丸速度 v 曲线及位移 x 曲线如图 6 所示。其中, 弹丸出膛时间为 7.441 ms, 出口速度为 1532 m/s。

评价脉冲功率电源的性能指标主要是输出电流的特征参数, 如负载电流峰值 I_m , 半峰值脉宽 T_w 等。评价电磁发射系统性能的指标主要是发射效率 η , 可表示为

$$\eta = \frac{E_m}{W_0} = \frac{mv_m^2}{nL_s I_0^2 + nCU_C^2} \quad (9)$$

式中: E_m 为弹丸出膛时的最大动能, W_0 为电源系统的初始储能。由于逆流电容的存在, 初始储能由两部分组成, 一部分为各级储能电感的总储能, 另一部分为各级逆流电容器的初始储能。

在基础模型的基础上, 分别去除拓扑中的不同类型二极管, 并保持其他参数与仿真条件不变, 得到仿真后的各参数结果对比如表 2 所示。

对比表 2 结果, 可以发现仅去除 D_{53} 或充电晶闸管反并二极管 $D_1 \sim D_5$, 系统的性能指标均无明显变化, 整体表现良好。此外, 在仿真过程中观察电源回路中各器件的电气参数, 可以发现逆流电容的电压波动 $< 15 \text{ V}$, 开关器件

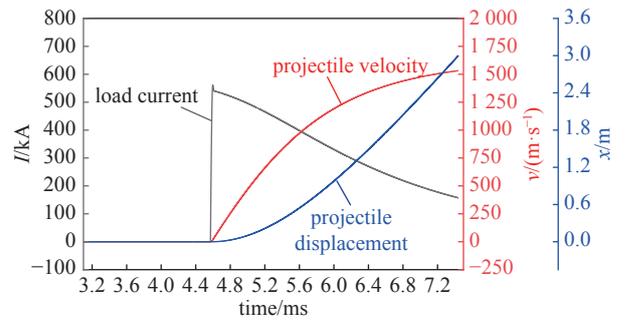


Fig. 6 Simulated waveform in Simulink

图 6 Simulink 仿真波形

表 2 仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results

simulation type	peak load current I_m/kA	50%~50% pulse width T_w/ms	projectile exit velocity $v_m/(\text{m/s})$	emission efficiency $\eta/\%$	emission efficiency without countercurrent capacitance $\eta_0/\%$
initial model	540.4	1.820	1532	18.39	19.32
remove D_{53}	540.8	1.820	1534	18.44	19.37
remove D_{12}	513.2	1.772	1540	18.57	19.51
remove D_{53} and D_{12}	513.2	1.774	1541	18.62	19.55
remove $D_1 \sim D_5$	540.7	1.819	1532	18.39	19.32

所承受的正反向电压值也处于可承受范围内,如:充电晶闸管的正向电压为 991.9 V, 逆流二极管最大反向电压为 -1842 V, 绝对值均小于充电电容电压 U_s , 对开关器件的选型以及正常工作均不会产生影响。但是去除 D_{12} 后, 明显发现负载电流的峰值减小、脉宽减小, 电枢的出口速度和发射效率略有提升, 出现这一现象的主要原因是实际仿真中发现负载电流在逆流阶段会出现一个极大的尖峰(接近 1000 kA), 导致电枢在更小电流峰值和脉宽的情况下反而具有更大的出口速度。但是尖峰电流易引起电弧侵蚀、槽蚀等现象, 降低电磁轨道炮的效率与寿命, 不利于实际工程中采用, 所以去除 D_{12} 会影响装置的工作性能, 实际使用时应保留。

3.2 充电晶闸管反向电压分析

充电晶闸管反并二极管 $D_1 \sim D_5$ 的作用主要是减小充电晶闸管上出现的反向电压。反向电压的产生与逆流电容的预充电电压值存在必然联系。在去除 $D_1 \sim D_5$ 的情况下, 保持其他条件不变, 仿真得到充电晶闸管端电压与逆流电容器预充电电压之间的关系如表 3 所示。

表 3 充电晶闸管端电压变化
Table 3 Voltage change of charging thyristor

recharge voltage of countercurrent capacitance U_{cc}/V	T_1 maximum reverse voltage U_{m1}/V	T_2 maximum reverse voltage U_{m2}/V	T_1 maximum forward voltage U_{f1}/V	T_2 maximum forward voltage U_{f2}/V
3500	-1388	-1389	991.2	392.6
3700	-1602	-1603	993.8	395.8
4100	-2304	-2305	999.3	400.7
4300	-2761	-2762	1002.0	403.4
4700	-3486	-3487	1008.0	409.0
4900	-3559	-3560	1011.0	412.0

随着逆流电容预充电电压的增大, 充电晶闸管的反向电压最大值 U_{m} 逐渐增大, 并且占比逆流电容的预充电电压值也逐渐增大。这说明, 在去除反并二极管 $D_1 \sim D_5$ 的情况下, 需要对逆流电容的参数进行优化, 使逆流电容具备更小的能量, 在保证可靠关断充电晶闸管的前提下, 尽量降低充电晶闸管的反向电压, 可对开关器件的数量简化起到积极作用。

仿真中同样发现, 充电晶闸管的正向电压呈现第一级较大、后几级较小的趋势, 主要原因在于第一级直接与初级电源 U_s 连接, 在储能电感充电结束后, U_s 上的剩余电压会作用在第一级晶闸管上, 导致第一级晶闸管承受的正向电压增大。反向电压则主要与逆流过程有关, 各级逆流电容参数相同, 因此并未表现出明显差异, 可结合实验进行验证。

3.3 电源模块器件数量简化

对于多级 XRAM 型脉冲功率电源模块, 在优化逆流电容参数的前提下, 均可简化最后一级逆流电容串联二极管 D_{n3} 以及充电晶闸管的反并二极管 $D_1 \sim D_n$ 。表 4 列举了电源模块的简化程度与每个电源模块的级数的关系, 可见电源模块的级数越少, 减少的开关器件占比就越大。但是对于 XRAM 型脉冲功率电源而言, 储能电感的级数过

表 4 电源模块简化程度与级数的关系

Table 4 Relationship between simplification degree and series of power modules

power supply stages	total number of switching devices before simplification	total number of switching devices after simplification	quantity proportion of simplification/%
2	11	8	27.3
3	16	12	25.0
4	21	16	23.8
5	26	20	23.1
6	31	24	22.6
7	36	28	22.2
8	41	32	22.0
9	46	36	21.7
10	51	40	21.6

少,不利于发挥电感储能的高能密优势。因此在实际设计电源时,应兼顾级数与开关器件数量和电感储能密度之间的关系,选择合理的电源模块级数,搭配高能密的多级 XRAM 型储能电感和逆流电容。

4 结 论

本文对充电过程中各级储能电感与逆流电容组成的回路展开了具体分析,从工作原理上阐述了基础拓扑中各类二极管的主要作用。基于 Simulink 仿真平台,建立了模块化 XRAM 电感储能型脉冲功率电源驱动轨道炮负载的仿真模型。结果表明,对于多级 XRAM 电源系统:去除最后一级的逆流电容串联二极管 D_{n3} 对系统输出性能影响较小,负载电流特征参数及系统效率均无明显变化;去除第一级的下臂二极管会导致负载电流出现明显尖峰,不利于导轨的设计;去除充电晶闸管反并二极管 $D_1 \sim D_n$ 能够显著减少器件数量,但是需要与逆流电容的参数优化相配合,否则将导致充电晶闸管上出现过大的反向电压。实际装置设计时,电源模块的级数会对开关器件的简化程度产生影响。在之后的研究中,可以进一步分析电源系统与轨道炮系统的参数匹配问题,结合具体实验结果,寻求能减小装置总体积的更适合参数设置。

参考文献:

- [1] 马山刚,于歆杰,李臻.用于电磁发射的电感储能型脉冲电源的研究现状综述[J].*电工技术学报*,2015,30(24):222-228,236.(Ma Shangang, Yu Xinjie, Li Zhen. A review of the current research situation of inductive pulsed-power supplies for electromagnetic launch[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(24): 222-228,236)
- [2] Liebfried O, Hundertmark S, Frings P. Inductive pulsed power supply for a railgun artillery system[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(5): 2550-2555.
- [3] 李军,严萍,袁伟群.电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J].*高电压技术*,2014,40(4):1052-1064.(Li Jun, Yan Ping, Yuan Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(4): 1052-1064)
- [4] Kanter M, Pokrvaio A, Shaked N, et al. Factors in inductive storage system design[C]//Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. 1995: 186-191.
- [5] Yu Xinjie, Liu Xukun. Overview of circuit topologies for inductive pulsed power supplies[J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2017, 1(3): 265-272.
- [6] Liebfried O. Review of inductive pulsed power generators for railguns[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(7): 1108-1114.
- [7] Liu Xukun, Yu Xinjie. A new pulse-compression circuit with residual energy recovered[C]//2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2018: 1-4.
- [8] Liebfried O, Brommer V. A four-stage XRAM generator as inductive pulsed power supply for a small-caliber railgun[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2805-2809.
- [9] DedieP, Brommer V, Scharnholz S. Experimental realization of an eight-stage XRAM generator based on ICCOS semiconductor opening switches, fed by a magnetodynamic storage system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(1): 266-271.
- [10] DediéP, Brommer V, Scharnholz S. Twenty-stage toroidal XRAM generator switched by countercurrent thyristors[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(1): 263-267.
- [11] Dedie P, Brommer V. Wire explosion fed by a 32-kJ XRAM generator switched by semiconductor elements[C]//2009 IET European Pulsed Power Conference. 2009: 1-4.
- [12] Liebfried O, Roch M. Augmented railgun with integrated XRAM current multiplication[C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). 2014: 279-282.
- [13] LiebfriedO, BrommerV. Demonstration of a 1 MJ XRAM generator supplying a medium caliber railgun[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 225018-225031.
- [14] 于歆杰,初祥祥.串充并放型电感储能脉冲电源XRAM的解耦改进[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2012,52(5):710-714.(Yu Xinjie, Chu Xiangxiang. Decoupling to improve XRAM inductive pulse power sources with series charging and parallel discharging characteristics[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2012, 52(5): 710-714)
- [15] EngelT G, Neri J M, Veracka M J. Characterization of the velocity skin effect in the surface layer of a railgun sliding contact[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(7): 1837-1844.
- [16] BarberJ P, Challita A. Velocity effects on metal armature contact transition (railguns)[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, 29(1): 733-738.
- [17] Aigner S, Igenbergs E. Friction and ablation measurements in a round bore railgun[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, 25(1): 33-39.
- [18] Liang Zhi, Dai Ling, Feng Yongjie, et al. Modeling and parameter study of electromagnetic launch system driven by inductive pulsed power supply[C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering. 2021: 784-789.