DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191503

脉冲功率源瞬态反向过电流机理及优化

徐 麟[1] 张 军[1] 刘 佳[2] 董健年[1] 王 浩[1]

（1. 南京理工大学能源与动力工程学院 南京 210094
2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210007）

摘要 针对脉冲功率源使用过程中出现的反向浪涌过电流问题，该文建立带有充电机输出端整流桥的脉冲成形网络等效电路。采用理论分析与仿真计算相结合的方法，讨论电路放电三个阶段的机理，分析充电机输出端整流桥过电流烧毁的原因，并提出抑制反向浪涌过电流的方法。研究表明，充电机整流桥与脉冲电容器反向并联后改变了原有脉冲成形网络拓扑结构，由于回路分布参数的影响，整流桥在换路阶段与续流硅堆同时导通，并产生瞬态浪涌过电流。晶闸管在换路后没有截止，电容器通过晶闸管回路不断充放电。采用在整流桥支路串接大功率阻尼电阻的方法可以有效降低浪涌过电流，并使晶闸管正常关断，电容器反压通过整流桥支路释放能量，延长电容器使用寿命。实验结果表明，阻尼电阻能有效降低反向浪涌过电流，整流桥没有再出现损坏。该方法有助于提升紧凑型脉冲功率源的可靠性，为后续脉冲功率系统设计提供了参考。

关键词： 电磁发射 脉冲功率源 反向过电流 脉冲成形网络

中图分类号： TM89

Mechanism and Optimization of Transient Reverse Overcurrent in Pulse Power System

Xu Lin[1] *Zhang Jun*[1] *Liu Jia*[2] *Dong Jiannian*[1] *Wang Hao*[1]

（1. School of Energy and Power Engineering Nanjing University of Science and Technology Nanjing 210094 China
2. The 28th Research Institute of CETC Nanjing 210007 China）

Abstract According the problem of reverse surge overcurrent in the pulse power source, the equivalent circuit of pulse forming network with output rectifier bridge of charger was established. The mechanism of circuit working was discussed, the reason of overcurrent burnout of rectifier bridge was analyzed, and the method of restraining reverse surge overcurrent was put forward. The results show that the parallel connection of the charger's rectifier bridge and the pulse capacitor changes the topology of the pulse forming network, and the branch of the rectifier bridge starts to turn on at the stage of switching. Under the influence of distribution parameters of the circuit, the instantaneous surge current will be generated. The thyristor is not turned off after switching. The capacitor is continuously charged and discharged through the thyristor branch. The method of series connection of high power and small resistance damper resistance in rectifier bridge branch can effectively reduce surge overcurrent, turn off thyristor normally, release capacitor's reverse voltage through rectifier bridge branch, and prolong the service life of capacitor. The experimental results show that the damping resistance can effectively reduce the reverse surge overcurrent, and the rectifier bridge is not damaged again. This method is helpful to improve the reliability of compact pulse power source and provides a reference for the design of subsequent pulse power system.

Keywords: Electromagnetic launch, pulsed power source, reverse overcurrent, pulse forming network

收稿日期 2019-11-18 改稿日期 2019-12-26

0 引言

电热化学发射是一种用电能辅助化学推进剂发射物体的技术，是电磁发射应用的重要发展方向，具有广阔的研究前景。脉冲功率源是电热化学发射系统中的关键组成部分与初始能量来源，为发射系统提供高幅值、高上升率的脉冲电流，主要由充电机初级能源和脉冲成形网络（Pulse Forming Network, PFN）组成[1-5]。其中，脉冲成形网络主要包括脉冲电容器、电抗器、晶闸管开关及续流硅堆等装置，采用多个模块并联时序放电能够得到近似平顶的电流波形[6-8]。

高功率充电机采用高频、恒流充电模式，通过脉冲升压变压器将初级能源的低电压能量转化为高压，为脉冲电容器充电。充电机输出端需经整流桥整流后才能与电容器连接，在 PFN 放电过程中整流桥始终与电容器反向并联，等效于在原有续流硅堆支路的基础上，在电容器两端直接并联额外的二极管支路。这改变了原放电网络的拓扑结构，放电动态过程产生了变化。文献[9]讨论了多模块脉冲电源在时序放电过程中续流硅堆两端产生反向电压振荡的问题，并提出了在续流硅堆两端并联电阻的解决措施。文献[10]针对续流硅堆在 PFN 中并联的位置进行了分析，讨论了续流硅堆并联在主放电开关之后和直接与电容器并联两种情况下的过渡过程，给出了续流二极管选择的相关指标。文献[11]讨论了放电主开关在 PFN 中的放置位置对储能电容器反向充电的影响，给出了将主放电开关置于负载支路使续流硅堆支路直接与电容器并联的方法来释放电容器的反向电压。上述文献对续流支路的位置和放电过程进行了相关讨论，但均未对充电机输出端连接在电容器两端的实际情况进行分析。在高压实验中数次出现整流桥损坏的情况，针对此问题，本文对 PFN 放电过程进行了理论分析，在此基础上提出了降低整流桥支路浪涌过电流的方法。

1 实验系统简介

电容储能型脉冲功率源系统电路原理如图 1 所示。图中，充电机为串联谐振高压充电机，整流桥为充电机输出端整流装置，C 为脉冲电容器，L_C 为电容支路杂散电感，R_C 为电容内阻，S 为晶闸管开关，L_L 为脉冲电抗器电感，VD 为续流硅堆，L_D 为续流支路电感，R_L 为等效负载电阻。充电机完成对脉冲电容器充电后，当晶闸管开关导通时，由于 PFN 工作于欠阻尼状态，电容器中存储的电能以振荡的形式向电抗器和负载传递，此时续流硅堆承受反压截止。当电容器能量释放完毕后，续流硅堆开始导通并将电容器旁路，电抗器中存储的磁场能量继续通过续流硅堆向负载传递。

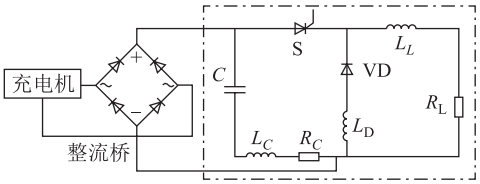


图 1 脉冲功率源系统电路原理

Fig.1 Circuit diagram of pulse power source system

为了研究电热化学发射用脉冲电源系统的工作状态，基于 PFN 电路原理，搭建了一套脉冲电源模拟实验系统，主要包括 100kJ 脉冲功率源模块和 30kW 高压充电机，实验平台如图 2 所示。充电机与电容器使用屏蔽线连接，负载与电源通过同轴电缆连接，当高压充电机对电容器充电完成时，通过上位机远程触发晶闸管开关完成放电。脉冲功率源技术参数见表 1。

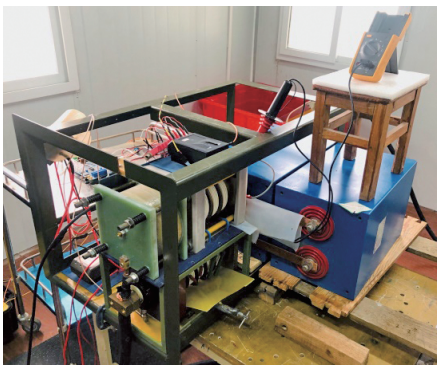


图 2 实验平台

Fig.2 Experimental platform

表 1 脉冲功率源技术参数

Tab.1 Key parameters of pulse power source

参 数	数 值
脉冲电容器容值 C/mF	2
电容器支路杂散电感 L_C/μH	0.3
电容器支路杂散电阻 R_C/mΩ	1
脉冲电抗器电感 L_L/μH	55
续流硅堆支路电感 L_D/μH	0.2
负载电阻 R_L/mΩ	50
脉冲电容器初始电压 U_0/kV	9

2 过电流现象及机理分析

2.1 实验现象

经过连续数次电压 9kV 放电实验后，充电机

无法正常工作，输出电流异常。逐项排查发现充电机输出端整流桥出现损坏情况，整流桥外观无异常，但经检测发生整流桥短路击穿，损坏的整流桥如图 3 所示。同时，通过数据采集系统发现电容器在换路过程中出现瞬态反向过电压，据此分析认为，该换路过程的过电压是引起整流桥过电流烧毁的原因。

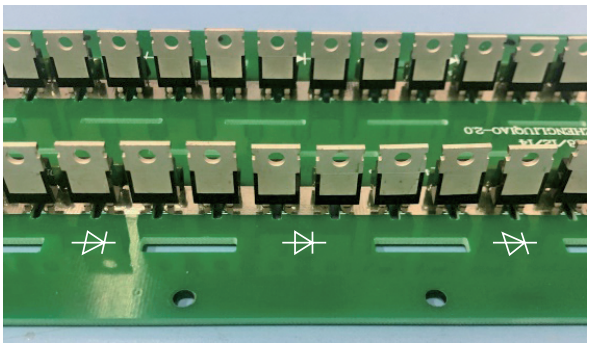


图 3　损坏整流桥

Fig.3　Damaged rectifier bridge

2.2　典型脉冲成形网络放电分析

典型电容储能型脉冲成形网络拓扑如图 1 点画线框所示。考虑回路分布参数的影响，典型脉冲成形网络的放电可以分为三个阶段[10-13]。

1）第一阶段。当充电机完成对脉冲电容器的充电时，电容器初始电压为 U_0，初始时刻 t=0 时，控制电路向晶闸管发出触发信号使其导通，续流硅堆承受反向电压处于反向截止状态。由于电磁发射中负载阻值较小，脉冲电容器、电抗器及负载构成了 RLC 欠阻尼振荡放电回路。电容器通过电抗器向负载释放能量，同时电抗器存储磁场能量。假设负载初始电流 $i_{\mathrm{L}}=0$，u_C 为电容器电压，u_L 为回路电感电压，u_R 为回路电阻电压，根据 KVL 可得

$$-u_C+u_R+u_L=0 \tag{1}$$

电容器电压采用非关联参考方向，电感和电阻电压采用关联参考方向，则有

$$i_{\mathrm{L}}=-C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$u_R=Ri_{\mathrm{L}}=-RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

$$u_L=L\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L}}}{\mathrm{d}t}=-LC\frac{\mathrm{d}^2u_C}{\mathrm{d}t^2} \tag{4}$$

把其代入式（1）可得

$$LC\frac{\mathrm{d}^2u_C}{\mathrm{d}t^2}+RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=0 \tag{5}$$

式中，$L=L_L+L_C$；$R=R_L+R_C$。

又知，在脉冲放电回路中负载阻抗较小，$R<2\sqrt{L/C}$，放电回路工作在欠阻尼状态，令 $\delta=\dfrac{R}{2L}$，$\omega^2=\dfrac{1}{LC}-\left(\dfrac{R}{2L}\right)^2$，又令 $\omega_0=\sqrt{\delta^2+\omega^2}$，$\gamma=\arctan\dfrac{\omega}{\delta}$，则 $\delta=\omega_0\cos\gamma$，$\omega=\omega_0\sin\gamma$。

可求得电容电压和负载电流分别为

$$u_C=\frac{U_0\omega_0}{\omega}\mathrm{e}^{-\delta t}\sin\left(\omega t+\gamma\right) \tag{6}$$

$$i_{\mathrm{L}}=-C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=\frac{U_0}{\omega L}\mathrm{e}^{-\delta t}\sin\left(\omega t\right) \tag{7}$$

脉冲电容器在此阶段始终处于放电状态，电抗器通过磁场存储能量。当电容器电压下降至与电抗器电压与负载电压之和相等时，续流硅堆将处于临界导通状态。由于电路分布参数的影响，续流硅堆的开通与晶闸管的关断不会瞬时完成，此后进入放电第二阶段。

2）第二阶段。第二阶段是晶闸管关断、续流硅堆导通的换路过程。当续流硅堆承受正向电压开始导通时，由于回路分布参数的影响，晶闸管不会马上关断，其电流逐渐减小并向续流支路转移，负载电流在通过续流硅堆续流导通的同时也通过晶闸管给电容器反向充电。当电容器反向充电电流减小至零时，晶闸管恢复正向阻断状态，电容器反压达到最大值并保持不变，此时负载电流完全转移至续流硅堆支路续流，第二阶段换路过程完成。令 i_C 为电容支路电流，i_{D} 为续流支路电流，则此阶段总电流可表示为

$$i=i_C+i_{\mathrm{D}} \tag{8}$$

3）第三阶段。第三阶段晶闸管已经完全关闭，电容器上的电压保持反向不再变化，电抗器通过续流硅堆与负载构成 RL 一阶放电回路，直至电抗器存储的磁场能量释放完毕，放电过程结束。设换路完成后的负载电流为 I_{t}，此阶段负载电流可表示为

$$i_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{t}}\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{9}$$

通过上述分析可以发现，由于 PFN 各支路杂散电阻及电感的存在，电容器电压过零的时间略微滞后于续流硅堆完全导通的时间，但超前于晶闸管恢复正向阻断的时间，第二阶段的换路过程不是瞬间完成，这就导致了电路过渡过程会对电容器进行反

向充电，电容器反向电压无法释放。

在脉冲成形网络放电过程中，充电机输出端整流桥始终并联在电容器两端，根据 2.2 节 PFN 放电阶段的分析，并结合实际整流桥在 PFN 放电后过电流烧毁的情况，考虑整流桥的损坏与 PFN 放电第二阶段换路过程及电容器反向充电过程有关。在充电机充电过程结束后，电容器电压为正，整流桥承受反向电压保持反向截止状态。在电容器反向充电的过程中，整流桥支路两端承受正向电压导通。从第二阶段换路过程开始，由于整流桥支路的参与，PFN 放电拓扑发生了改变，需进一步分析在电容器两端并联整流桥支路的脉冲成形网络放电情况。

2.3 实际脉冲成形网络放电分析

为满足脉冲功率源连续放电的要求，充电机为电容器充电完成后依然需要与电容器保持连接，这就使充电机输出端整流桥始终与电容器并联，等效于在电容器两端并联了额外的二极管支路。该支路在 PFN 第二阶段换路过程中导通，分担了续流硅堆的续流作用，并在放电回路中激起相当大幅度的振荡，脉冲成形网络拓扑也随之发生了变化。以往对这种情况的分析较少，部分研究通过改变续流硅堆位置的方法来抑制电容器反向充电的现象，但这并不能阻止整流桥支路的导通。同时，电容器两端反并联整流桥为其在第二阶段存储的反向电压提供了释放通道，放电第三阶段电容器承受的反压不会保持，而是通过整流桥释放。

实际脉冲功率源放电拓扑由图 1 点画线框内部分与整流桥支路组成，由于该 PFN 拓扑换路过程十分复杂，依据电路原理搭建仿真模型来进行分析，将整流桥等效为二极管，仿真参数见表 1，电容器电压和负载电流如图 4 所示。

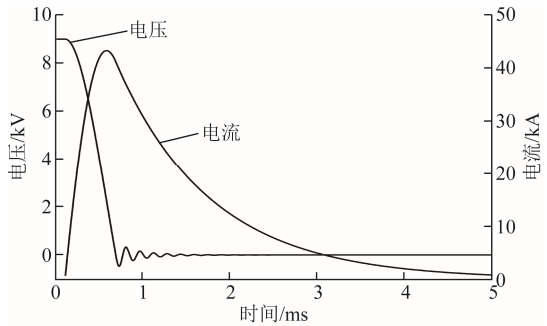


图 4 带整流桥 PFN 电容器电压和负载电流波形

Fig.4 Capacitor voltage and load current with PRN rectifier

从图 4 中可以看出，负载电流输出波形正常，峰值达到 45kA。在电源开始放电后，电容器电压快速下降至零，随后由于各支路分布参数的影响，电容器电压过零后开始反向充电。但电容器反压不会保持，而是通过整流桥支路在不断充放电过程中振荡衰减。

PFN 各支路电流如图 5 所示。在换路过程中晶闸管没有关断，其电流以振荡的形式逐渐减小直至放电结束。整流桥和续流硅堆在换路阶段同时开始导通。续流硅堆电流快速上升至 27kA 后也以振荡的形式逐渐衰减，始终保持导通状态。整流桥在换路过程开始后的前两个周期在开通与关断之间切换，随后始终保持开通状态。通过整流桥的电流峰值逐次减小，第一个电流峰值最大，达到 55kA，第二个峰值下降为 27kA。由于充电机采用恒流等台阶式升压充电模式，充电机的输出电流较小，选用的整流桥二极管浪涌电流能力只有 200A。而整流桥支路在振荡放电前 3ms 的电流峰值都达到了 kA 级别，远远超过了整流桥中二极管所能承受的浪涌电流范围，这就导致了整流桥出现过电流击穿的现象。

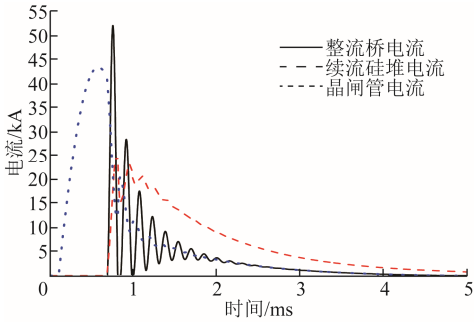


图 5 PFN 各支路电流

Fig.5 Branch currents of PFN

3 反向过电流保护

3.1 反向过电流抑制方法

由第 2 节分析可知，整流桥支路电流峰值达到 55kA，远远超过整流桥中二极管的承受能力。因此，需要采取措施将电流脉冲尖峰限制在二极管的浪涌通流能力之内。PFN 各支路的杂散参数与选用器件型号、批次以及线缆的长度有关，较难改变。将整流桥中串联二极管更换为满足浪涌电流要求的大功率二极管无疑会大大增加充电机体积，不利于紧凑、小型化设计。串联电感是一种较好的限制电流峰值的方法，但串接的电感同时也会参与充电机对电容器的充电过程，改变充电机一次侧谐振参数，减小充电电流上升率，降低充电效率。本文提出在充电机整流桥输出端串接阻尼电阻来抑制电流峰值的方法。

阻尼电阻能够抑制整流桥支路的电流振荡，减小电流的峰值。就实际 PFN 拓扑而言，安装在整流桥支路的阻尼电阻不会参与脉冲电源放电的第一阶段，仅在电路换路过程开始后发挥作用，也就不会影响负载电流的上升率和峰值。同时，阻尼电阻的阻值一般较小，参与放电的时间较短，基本不会对脉冲电源能量利用率产生影响。

3.2　阻尼电阻的选择

由于阻尼电阻在充电机给电容器充电和脉冲电源放电的第二阶段、第三阶段会消耗电能，为了提高充电机充电效率并提升脉冲电源能量利用率，在使整流桥支路浪涌电流满足二极管通流能力的情况下，阻尼电阻的阻值应尽可能小。分别选用 2Ω、6Ω 及 10Ω 电阻进行仿真分析，整流桥支路电流仿真结果如图 6 所示。

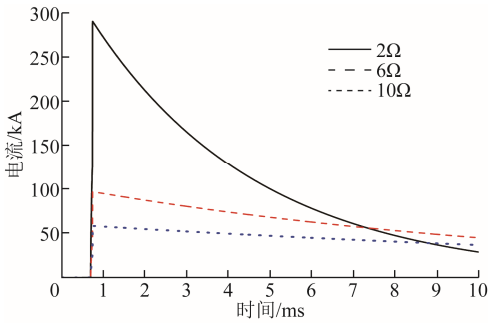
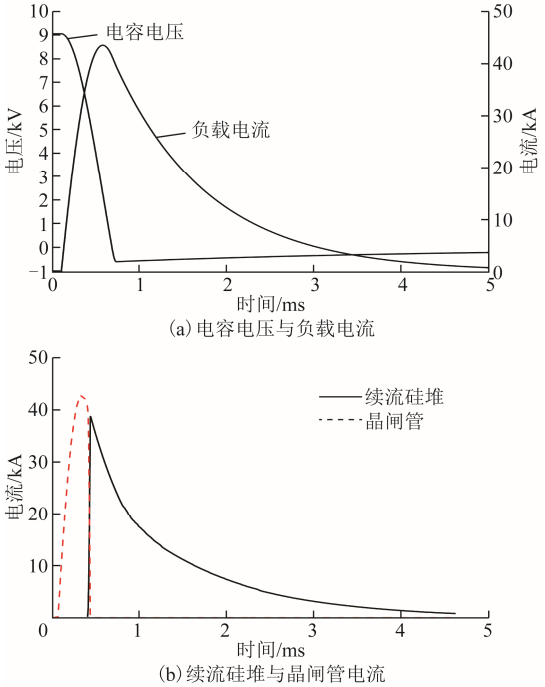


图 6　安装阻尼电阻后整流桥支路电流波形

Fig.6　Rectifier current with damping resistor installed

从图 6 可以看出，三种阻尼电阻均能有效减小整流桥支路浪涌电流峰值，串联阻值越大，整流桥支路浪涌电流越小，10Ω、6Ω 及 2Ω 阻值对应的三个浪涌电流峰值分别为 58A、97A 和 291A。串联 6Ω 和 10Ω 电阻均能满足浪涌电流要求，但阻值越大，充电机充电阶段消耗的能量越多，电容器与整流桥支路构成的反向 RC 放电时间越长，既降低了充电效率也会影响电容器的使用寿命。综合考虑各项指标，选择 6Ω 阻尼电阻较为合适。

图 7 为整流桥支路串联 6Ω 电阻后相关电压电流波形。从图 7a 中可以看出，负载电流峰值与不串联电阻相比没有变化，在 0.7ms 达到电流峰值 45kA。从图 7b 中可以看出，晶闸管在换路过程结束后完全关断，没有出现电流振荡的情况。同时，由于晶闸管的关断，续流硅堆导通后进入第三放电阶段，电流达到峰值后缓慢下降。电容器反向充电后谐振回路被晶闸管切断，电容器反向电压经整流桥支路 RC 一阶放电，延长了电容器的使用寿命。



(a) 电容电压与负载电流

(b) 续流硅堆与晶闸管电流

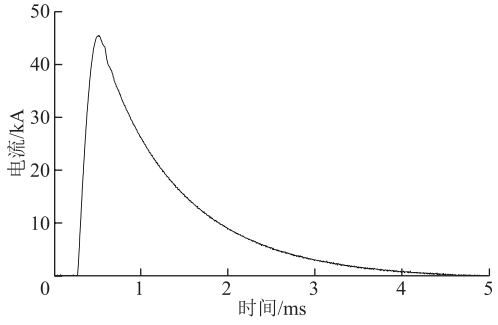
图 7　串联 6Ω 电阻后电压电流波形

Fig.7　Voltage and current waveforms installed with 6Ω damping resistor

3.3　实验验证

充电机采用高频串联谐振充电模式，输出电流经整流桥整流后近似于高频正弦半波。充电回路分布电感会影响变压器一次侧的谐振参数，减小充电电流变化率，降低充电机充电速度，因此要选择无感电阻进行串联。同时，电阻既要有良好的散热性，又要做到小型化。经分析与检测，选用了某型号高功率无感陶瓷电阻进行串联，陶瓷电阻的电感很小，电阻体热容大，造型设计灵活，在满足体积要求的情况下与同阻值电阻相比能吸收更多热量。

对改进后的脉冲功率源系统进行实验，整流桥未再出现损坏的情况。经过多次连续放电实验，阻尼电阻发热量正常，能够满足散热要求。实验负载电流波形和电容电压波形如图 8 所示。负载输出电流峰值 46kA，脉冲电容器在换路过程开始后进行反



(a) 负载电流

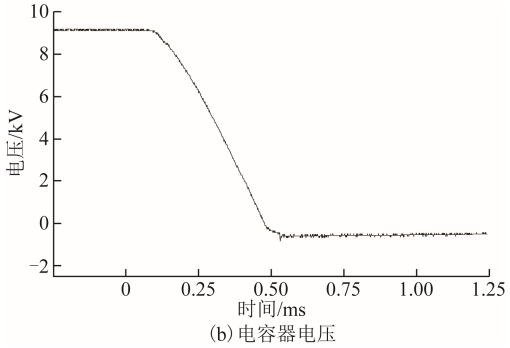


图 8 实验电压电流波形

Fig.8 Experimental voltage and current waveforms

向充电，反向电压峰值 580V。晶闸管正向截止后电容器反压通过整流桥支路阻尼电阻 RC 一阶放电，反向电压快速降低。

4 结论

本文对脉冲功率源系统反向过电流现象进行了研究，分析了传统脉冲成形网络放电拓扑。为了满足连续放电要求，脉冲功率源电容器两端始终并联充电机输出整流桥支路，放电拓扑发生了变化。分析了实际脉冲功率源拓扑，各支路分布参数导致在电源换路过程中电容器被反向充电，整流桥支路承受正向电压导通，产生极大的浪涌过电流，导致整流桥串联二极管过电流烧毁。

研究了整流桥支路反向过电流抑制措施，为避免回路发生谐振，在整流桥支路串联电阻增大阻尼比来消谐。阻尼电阻在第一阶段不参与放电，对负载电流峰值不会产生影响。通过仿真分析，选用 6Ω 阻尼电阻较为合适，且晶闸管在换路结束后关断，电容器不发生电压振荡，反向电压向整流桥支路泄放，提升了电容器的使用寿命。实验结果表明，串联阻尼电阻后整流桥不再损坏，过电流抑制效果良好，脉冲功率源输出正常。

参考文献

[1] 李超, 鲁军勇, 马伟明, 等. 电磁发射用多级混合储能充电策略优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 118-124.
Li Chao, Lu Junyong, Ma Weiming, et al. Charging strategy amelioration of multilevel hybrid energy storage for electromagnetic launch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 118-124.

[2] 刘旭堃, 于歆杰, 刘秀成. 电容储能型脉冲电源分时分段触发策略自动计算方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 187-193.
Liu Xukun, Yu Xinjie, Liu Xiucheng. An automatic calculation method for the triggering strategy of the capacitive pulsed-power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 187-193.

[3] Winfrey A L, Al-Halim M A A, Mittal S, et al. Study of high-enthalpy electrothermal energetic plasma source concept[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(7): 2195-2220.

[4] 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.
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.

[5] 常馨月, 于歆杰, 刘旭堃. 一种实现电枢出膛速度控制的电磁轨道炮脉冲电源触发策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2261-2267.
Chang Xinyue, Yu Xinjie, Liu Xukun. A velocity controlling triggering strategy of capacitive pulsed power supply electromagnetic railgun system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2261-2267.

[6] 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.

[7] 俞小华, 董健年, 王浩. 脉冲电抗器结构应力测量[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 124-129.
Yu Xiaohua, Dong Jiannian, Wang Hao. Measurement method of the stress in pulsed reactor structure[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(3): 124-129.

[8] 张亚舟, 李贞晓, 金涌, 等. 电磁发射用 13MJ 脉冲功率电源系统研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 778-784.
Zhang Yazhou, Li Zhenxiao, Jin Yong, et al. Research and development on a 13MJ pulsed power supply for electromagnetic launcher[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(5): 778-784.

[9] 林庆华, 栗保明. 电容储能高功率脉冲成形网络浪涌过程分析[J]. 南京理工大学学报（自然科学版）,

2008, 32(6): 729-732.
Lin Qinghua, Li Baoming. Analysis on surge process generated in high power pulse forming network with capacitor energy storage system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science), 2008, 32(6): 729-732.

[10] 董健年, 李鸿志, 栗保明. 大功率二极管脉冲功率源中的过渡过程[J]. 弹道学报, 2001, 31(1): 41-45.
Dong Jiannian, Li Hongzhi, Li Baoming. Transient process of PFN with diode[J]. Journal of Ballistics, 2001, 31(1): 41-45.

[11] 刘建宝, 邵英, 秦昕昕. 脉冲电源储能电容反向充电电压释放方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(8): 41-47.
Liu Jianbao, Shao Ying, Qin Xinxin. Releasing method for reverse charging voltage of stored energy capacitor in pulsed power supply system[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(8): 41-47.

[12] Jin Y S, Lee H S, Kim J S, et al. Performance of 2.4-MJ pulsed power system for electrothermal-chemical gun application[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2003, 39(1): 235-238.

[13] Wang Z C, Wang D Y, Zhang Z J, et al. Analysis and design of a LCC resonant current-source power supply for PFU charging applications[C]//IEEE Pulsed Power Conference, Austin, VSA, 2015: 1-6.

作者简介

徐　麟　男　1992 年生，博士研究生，研究方向为脉冲功率技术。
E-mail：xhotter@163.com

张　军　男　1969 年生，副研究员，硕士生导师，研究方向为电磁发射技术。
E-mail：zhtell800@163.com（通信作者）

（编辑　陈诚）