·特种电源技术·



240 kJ 模块化能库型脉冲放电电源研制

李松杰1, 赵娟!, 康传会1, 黄宇鹏1, 邓维军1. 肖金水1, T明军1. 键², 波1, 关 毛傲华2, 李洪涛1, 鄂 鹏², 马 勋¹ 李

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621900; 2. 哈尔滨工业大学 空间环境与物质科学研究院,哈尔滨 150001)

摘 要: 空间等离子体环境模拟与研究装置用于在地面模拟空间磁场和等离子体环境,需要在3.5 μH电 感、0.8 mΩ电阻的环向场线圈负载上产生前沿130 μs、降流时间不大于1600 μs、峰值260 kA的脉冲电流,因此设 计了一套模块化的电容器型放电电源。针对相对较小电感的负载,根据设计要求的放电波形和开关组件通流 能力,考虑负载短路故障的情形,给出了保护电感、优化的模块数量等回路参数计算方法。进一步采用传输电 缆作为能量传输,同时将电缆寄生电感作为保护电感的方案,研制了一套由4个模块组成的放电电源。研究结 果表明,本文给出的电路理论计算结果与设计要求一致,放电试验进一步证明电源设计满足设计放电波形要求。 关键词:脉冲电源;模块化;保护电感;晶闸管;传输电缆

中图分类号: TN782 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210564

Development of a 240 kJ modularized pulsed power supply

Li Songjie¹, Zhao Juan¹, Kang Chuanhui¹, Huang Yupeng¹, Deng Weijun¹, Xiao Jinshui¹, Ding Mingjun¹, Li Bo¹, Guan Jian², Mao Aohua², Li Hongtao¹, E Peng², Ma Xun¹ (1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Space Environment Simulation Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The space plasma environment research facility (SPERF) is used to simulate the space magnetic field and plasma environment on earth. To generate a pulse current across the 3.5μ H, $0.8 m\Omega$ toroidal field (TF) coils, a modularized capacitor-based pulsed power supply (PPS) was built. The rise time of the pulse current was approximately 130 µs, and the peak current was 260 kA. To avoid damage to the PPS when the coil load was shortcircuited, the circuit parameters of the PPS, such as the number of modules, the inductance of the protection inductor, were calculated based on current waveform requirements and the maximum ratings of the thyristor switch. Since the inductance of the coil load was relatively small, the output cable was used as both the transmission line and the protection inductor, and a 4-module PPS was designed and fabricated. Simulation results indicate that the 4-module PPS design meets the demand of both the current waveform and the maximum ratings of the thyristor switch, and the discharge test further proves the output current waveform of the PPS agrees with the simulation results.

Key words: pulsed power supply, modularized, protection inductor, thyristor switch, transmission cable

在地面模拟爆发性空间等离子体过程(如磁暴、高能粒子暴等)是研究空间基本等离子体物理过程(磁重联、 湍流等)的重要手段^[1],目前世界上模拟空间等离子体环境的装置主要有普林斯顿等离子体物理实验室 FLARE (Facility for Laboratory Reconnection Experiments)装置^[2]、加州大学洛杉矶分校 LAPD(LArge Plasma Device)装置^[3], 以及哈尔滨工业大学正在建设的空间等离子体环境模拟与研究系统 SPERF(Space Plasma Environment Research Facility)^[45]等。

SPERF系统中,磁体电源系统是重要系统,通过驱动磁体线圈用于模拟空间环境电磁场,研究与等离子体相互作用的问题。其中环向场(TF)线圈产生模拟磁层顶磁重联过程中的太阳风等离子体,需要设计一套能库电源,将能量快速释放于线圈上产生需要的等离子体⁶⁶。

^{*} 收稿日期:2021-12-20; 修订日期:2022-05-16

联系方式:李松杰, songjieli@126.com。

通信作者:鄂 鹏, epeng@hit.edu.cn;

马 勋,13778053819@163.com。

电容储能型能库电源的主要功能是储存较大能量,快速释放于负载,除了在空间等离子体环境地面模拟外,在 强磁场产生、电磁轨道炮等其他很多方面均得到了广泛应用^[7-12]。由于电容储能型电源能量较大,为防止负载短路 等情况造成放电电流急剧变化导致开关等组件受到损伤,通常需要设计保护电感,限制极端情况的输出电流,保护 设备不受到损伤^[13-15]。在强磁场产生的领域,负载通常为数百μH或mH级大电感,保护电感值一般远小于负载电 感,串联在回路中对放电波形影响较小,因此该类电源回路参数初步设计时可以忽略保护电感值;电磁轨道炮领 域,负载通常为mΩ级小电阻,接近短路,因此该类电源参数设计时可根据电流大小直接设计脉冲形成电感,设计 均相对较简化。然而 SPERF 装置中 TF 线圈负载为 3.5 μH 的小电感,在设计能库电源的回路参数时,既要实现对 波形的调节、又要实现负载短路故障时对电源限流、还要考虑电感的加工制造等多方面因素,设计难度较大。

本文介绍了 SPERF 装置中 TF 电源的设计,给出了回路参数设计方法,采用传输电缆作为保护电感,既能在 3.5 μH 的 TF 线圈负载上产生 260 kA 电流,又能在负载短路的情况下限制电流输出,保护开关组件不受到损坏,并通过仿 真和实测证明了设计的正确性和合理性。

1 电源参数设计

1.1 设计输入

TF 线圈的电参数为: 3.5 μH, 0.8 mΩ。

为产生所需的磁场,根据 TF 线圈的运行需求和工程实施条件,要求 TF 电源在 TF 线圈上输出的脉冲电流波形如 图 1 所示,定义电流幅值从 0% 上升至 100% 的时间为前沿 (*T*_r),电流幅值从 100% 下降至 10% 的时间为降流时间(*T*_d)。

根据物理实验和线圈耐受电动力的需求,在充电电压不超过 20 kV的条件下,电流峰值 $I_{max} \ge 260$ kA,前沿 T_r 在 130~140 μs之间,降流时间 T_d 不大于 1600 μs,不允许出现电流反峰。



Fig. 1 Typical current waveform required for the load 图 1 典型负载电流波形

1.2 电源参数设计

利用高压电容器组(包含 N 个电容和 N 个开关)储能,通过放电开关对线圈负载放电,电路原理如图 2 所示。



Fig. 2 Schematic of the PPS 图 2 电源系统电路原理图

整个放电过程分为2个阶段:(1)首先对电容器组充电,当电容器电压达到设定值时,充电电源停止充电,放电 开关闭合,电容器向线圈放电,通过RLC放电提供前沿和峰值;(2)采用续流二极管作为续流开关,在电流峰值时 使续流支路导通,通过调整续流电阻,调控脉冲后沿,以及抑制电容器反向电压。

为简化起见,忽略回路电阻。第1阶段放电为一个 LC 放电,其电流波形为正弦波,电流峰值 I_{max} 和前沿 T_r 计 算公式如下^[16]

$$I_{\rm max} = V_{\rm o} / \sqrt{\frac{L_{\rm s} + L_{\rm load}}{C}} \tag{(1)}$$

$$T_{\rm r} = \frac{\pi}{2} \sqrt{(L_{\rm s} + L_{\rm load})C} \tag{2}$$

式中: C 为电容器组的总电容值; L_s 为保护电感的电感值; L_{load} 为负载电感值; V_o 为电容器组充电电压。 第 2 阶段, 当放电电流达到峰值时续流支路导通, 续流支路电流计算公式如下^[17]

$$I_{\rm D}(t) = \frac{I_{\rm max}}{2\omega_{\rm c}CR_{\rm c}} \left[e^{(-\alpha_{\rm c}+\omega_{\rm c})T} - e^{(-\alpha_{\rm c}-\omega_{\rm c})T} \right]$$
(3)

电容器电流计算公式如下

$$I_{\rm c}(t) = \frac{I_{\rm max}}{2\omega_{\rm c}} [(-\alpha_{\rm c} + \omega_{\rm c}) e^{(-\alpha_{\rm c} + \omega_{\rm c})T} + (\alpha_{\rm c} + \omega_{\rm c}) e^{(-\alpha_{\rm c} - \omega_{\rm c})T}]$$
(4)

$$\alpha_{\rm c} = \frac{1}{2CR_{\rm c}} \tag{5}$$

$$\beta_{\rm c} = \sqrt{\frac{1}{(L_{\rm s} + L_{\rm load})C}} \tag{6}$$

$$\omega_{\rm c} = \sqrt{\alpha_{\rm c}^2 - \beta_{\rm c}^2} \tag{7}$$

式中: $T=t-T_r$; R_c 为续流电阻阻值。

负载电流可以通过基尔霍夫电流定律(KCL)得到

$$I_{\rm L}(t) = I_{\rm D}(t) + I_{\rm c}(t)$$
 (8)

为了防止电流反峰,电路必须满足过阻尼条件[18],续流电阻阻值必须满足如下条件

$$0 < R_{\rm c} < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{9}$$

采用晶闸管作为放电开关,晶闸管器件能承受的额定参数见表1。需要设计保护电感L_s,使得负载短路时电流 不超过晶闸管组件的额定参数。

表1 晶闸管器件主要额定参数

 Table 1
 Typical maximum ratings of the thyristor switch

| maximum current/ | critical rate of decrease of commutating on-state current $(di/dt)/(kA \cdot \mu s^{-1})$ |
|----------------------|---|
| kA(3 ms pulse width) | (duration between $10\% \sim 50\%$ of maximum current) |
| 120 | 3 |

当负载短路时,电路原理图如图 3 所示,此时放电电流 需满足晶闸管器件的额定参数要求。

$$I_{\rm sc} = V_{\rm o} \bigg/ \sqrt{\frac{L_{\rm s}}{C}} < 120N \tag{10}$$

$$\omega_{\rm s} = 1/\sqrt{L_{\rm s}C} \tag{11}$$

$$I_{\rm s} = I_{\rm sc} \sin \omega_{\rm s} t \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{(0.5 - 0.1)I_{\rm sc}}{t_2 - t_1} < 3N \tag{13}$$

其中 Isc 为负载短路时电流峰值。

$$t_2 - t_1$$

 $\hat{\pi} \hat{\Psi} \hat{\Pi}_{\circ}$
 $\sin(\omega_s t_2) = 0.5$ (14)
 $\sin(\omega_s t_1) = 0.1$ (15)



Fig. 3 Schematic of the PPS when the load is short-circuited 图 3 负载短路时电路原理图

对上述公式求解得到,当充电电压 $V_0=20$ kV 时,总电容 C=1.08 mF,保护电感 $L_s=2.9$ μ H,模块数量 N=4,此时续流电阻阻值 $R_c=38$ m Ω_o

)

上述参数下,对电源放电波形进行仿真,结果如图 4 所示。正常放电时,电流峰值 260 kA,前沿 T_r在 130~140 μs 之间,降流时间 T_D不超过 1600 μs,电流波形未出现反峰,满足设计要求;当负载短路时,总电流峰值不超过 390 kA, 总电流上升率 di/dt 约 7 kA/μs。电源采用 4 个模块,由 4 组晶闸管平均承受总电流冲击,平均每组晶闸管电流峰值 不超过 100 kA,电流上升率 di/dt 不超过 2 kA/μs,在额定值范围内,满足设计要求。







2 电源工程设计

2.1 工程设计方案

TF 电源由 4 台放电模块, 以及 4 台充电机、1 台本地控制器、电缆连接结构、电缆等组成, 如图 5 所示, 其中放电模块包含充电泄放组件、储能电容、主开关及续流开关组件等, 其功能电路原理和实物如图 6 所示。

作者实验室正好具有 320 μF 电容器和 100 mΩ 电阻,因此采用上述与设计参数接近的器件,即单个模块的电容器为 320 μF,单个模块的续流电阻为 100 mΩ。

将上述参数代入式(1)~(15),得到充电电压 Vo=18.1 kV,保护电感 Ls=2.7 μH。



 Fig. 6
 Basic circuit diagram and photograph of the discharge module

 图 6
 模块主要功能电路原理及实物

由于电源系统需要线缆传输电荷,因此考虑利用电缆寄生电感实现保护功能,不再单独设计保护电感。忽略 电阻效应,单位长度电缆参数约为电感 0.18 μH/m,求解得到电缆长度为 15 m。

综合考虑电容、负载、线缆的寄生 RLC 参数,考虑到回路存在一定电阻,且现场空间对布线存在一定限制,因此电缆长度取 10 m,对电源设计方案进行了 PSpice 建模与仿真。当充电电压为 20 kV 时,仿真结果如图 7 所示。 仿真结果表明,采用上述方案设计的电源,放电电流波形满足指标要求。

当负载发生短路时,对电源输出波形进行仿真分析,结果如图 8 所示。负载短路时总电流峰值约 420 kA,总电流上升率 di/dt 为 9.14 kA/µs。电源采用 4 个模块,由 4 组晶闸管平均承受总电流冲击,平均每组晶闸管电流峰值不超过 110 kA,电流上升率 di/dt 不超过 2.5 kA/µs,在额定值范围内,满足设计要求。



2.2 测试试验

将一整套 TF 电源,包括 4 台放电模块、4 台充电机、控制器、电缆、负载进行连接。测试现场如图 9 所示。对 TF 电源整机开展放电测试,其中模块电流测试采用经标定的型号为 CWT1500B(最大量程 300 kA)、CWT300B(最 大量程 60 kA)的 2 只电流探头分别测量放电模块的输出电流、续流电流,整机电流测试采用经标定的型号为





(b) the charge module and the controller

(c) the dummy load and transition cable

Fig. 9 Photographs of the test 图 9 电源测试现场

CWT1500B(最大量程 300 kA)的电流探头,在4个模块输出汇流连接结构处测量整套电源的输出电流。工作电压 为 20 kV 时,电源对模拟负载输出的放电波形如图 10 所示。



Fig. 10 Discharge current waveform of the PPS and discharge module 图 10 电源整机对负载放电实验结果

试验结果表明放电电流峰值达到 269 kA,前沿为 130 μs,降流时间为 490 μs,与模拟结果相比,前沿和峰值电流均基本一致,降流时间存在一些差异,但仍满足 < 1.6 ms 的要求,电源满足设计要求。

2.3 分析与讨论

由试验结果和仿真结果的对比可知,放电波形前沿和峰值电流基本一致。前沿和峰值实质上是一个 RLC 串 联放电,在能库电源中主要是储能电容对负载电感放电,涉及的电阻主要是回路内阻,阻值较小,因此在工程上初 步设计时可忽略电阻对前沿的影响。然而降流时间存在一些差异,因为降流时间除受到 RLC 主回路参数影响外, 还受到续流电阻 *R*_c 的影响。本文中设计的续流电阻 *R*_c 的阻值 25 mΩ,负载内阻为 0.8 mΩ,同时回路参数还存在一 定内阻,对降流时间存在一定影响。本文中初步分析降流时间约 0.4 ms,远远满足 1.6 ms 的指标要求,且留有较大 余量,因此暂未考虑内阻的影响。在类似项目设计时,如降流时间指标要求较高,还需考虑回路电阻阻值的影响。

此外,本文利用电缆的寄生电感作为保护电感限制输出电流,在不考虑内阻的情况下满足指标要求且有一定 余量。在考虑回路内阻的情况下,回路电阻也可以限制电流,对保护作用更为有利。

3 结 论

针对 SPERF 系统中的 TF 线圈负载,本文设计了一套 4 模块能库电源,可以在负载上产生 260 kA 的电流。为防止负载短路时电流损坏晶闸管组件,本文提出采用传输线缆寄生电感作为保护电感的方案,在保护电感对放电波形有一定影响的情况下,给出了保护电感等电源参数的设计表达式,通过仿真和试验验证了方案的可行性。

参考文献:

- Stenzel R L, Gekelman W. Laboratory experiments on current sheet disruptions, double layers turbulence and reconnection [M]//Kundu M R, Holman G D. Unstable Current Systems and Plasma Instabilities in Astrophysics. Dordrecht: Springer, 1985.
- [2] Melnik P A, Bushnell A H, Sieck P E, et al. Design of 5.5MJ charge dump power supply for the PPPL FLARE experiment [C]//2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). 2016.
- [3] Gekelman W, De Haas T, Daughton W, et al. Pulsating magnetic reconnection driven by three-dimensional flux-rope interactions[J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 235101.
- [4] E Peng, Guan Jian, Ling Wenbin, et al. An 18.3 MJ charging and discharging pulsed power supply system for the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF): Modular design method and component selection [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92: 034709.
- [5] E Peng, Guan Jian, Jin Chenggang, et al. An 18.3 MJ charging and discharging pulsed power supply system for the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF): the subsystem for the magnetopause shape control coils[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92: 064709.
- [6] Wu Biao. Vlasov equation of plasma in magnetic field [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1999, 32(31): 5835-5844.
- [7] Jorling J, Hofmann J, Weise T H G G, et al. 49 MJ pulsed power facility to produce high magnetic fields [C]//2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007.
- [8] Portugall O, Lecouturier F, Marquez J, et al. Pulsed magnetic fields in Toulouse past, present and future [J]. Physica B: Condensed Matter, 2001, 294/295: 579-584.
- [9] Debray F, Frings P. State of the art and developments of high field magnets at the "Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses" [J]. Comptes Rendus

Physique, 2013, 14(1): 2-14.

- [10] Perenboom J A A J, Maan J C, Van Breukelen M R, et al. Developments at the high field magnet laboratory in Nijmegen[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2013, 170(5/6): 520-530.
- [11] Sitzman A, Surls D, Mallick J. Design, construction, and testing of an inductive pulsed-power supply for a small railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 270-274.
- [12] Lee B, An S, Kim S H, et al. Operation of a 2.4-MJ pulsed power system for railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2886-2890.
- [13] Ding Hongfa, Jiang Chengxi, Ding Tonghai, et al. Prototype test and manufacture of a modular 12.5 MJ capacitive pulsed power supply [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1676-1680.
- [14] Lü Yiliang, Li Liang. Design on the protection inductor for the capacitor bank of Wuhan Pulsed High Magnetic Field facility[C]//2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008.
- [15] 彭波, 林福昌, 黄福勇, 等. 储能电容器组保护电感结构与保护方法的研究[J]. 高电压器, 2012, 48(6): 48-52,55. (Peng Bo, Lin Fuchang, Huang Fuyong, et al. Protection inductor structure and protection methods for pulsed capacitor banks[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 48-52,55.)
- [16] 韩旻, 邹晓兵, 张贵新, 等. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020. (Hank Min, Zou Xiaobing, Zhang Guixin. Pulse power technology base[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010)
- [17] 蒋成玺. 脉冲强磁场电源系统设计及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (Jiang Chengxi. Design and realization of pulse power supply system for pulsed high magnetic field[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013)
- [18] Saxena A K, Rawool A M, Kaushik T C. Crowbar scheme based on plasma motion for pulsed power applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10): 3058-3062.