

一种用于弧流电源的新型打坑电路设计^{*}

周细文^{1,2}, 刘 湘¹, 阳璞琼³, 宣伟民³

(1. 广东福德电子有限公司, 广东 东莞 523933; 2. 江苏同芯电气科技有限公司, 南京 210000;
3. 西南核物理研究院, 成都 610000)

摘 要: 作为中性束注入加热系统的核心设备,弧流电源的性能至关重要。打坑电路是弧流电源的重要组成部分,其动态响应特性及稳定性决定了弧流电源的性能。提出了一种用于弧流电源的新型打坑电路解决方案,能在 150 μs 内快速实现大电流的跌落和恢复,并且跌落和恢复过程中基本无过冲,用于转移的电子开关(比如 IGBT)在开关过程中过电压小,可靠性高,吸收电路容易实现。该方案可以很好地替代传统的弧流电源打坑电路。

关键词: 弧流电源; 打坑电路; 动态响应; 稳定性

中图分类号: TL631.24; TM46; TN713.8 **文献标志码:**A **doi:**10.11884/HPLPB201931.180326

Design of new type of pit circuit for arc current power supply

Zhou Xiwen^{1,2}, Liu Xiang¹, Yang Puqiong³, Xuan Weimin³

(1. Guangdong Fullde Electronics Co, Ltd, Dongguan 523933, China;
2. Jiangsu United Core Electrical Technology Co, Ltd, Nanjing 210000, China;
3. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610000, China)

Abstract: As the core equipment of the neutral beam injection heating system, the performance of arc power supply is very important. With the development and popularization of super capacitor technology, arc current power supply based on super capacitor has been widely used in many large-scale scientific devices. Pit circuit is an important component of arc current power supply. Its dynamic response characteristics and stability determine the performance of arc current power supply. A new current transfer circuit for arc current power supply is proposed in this paper, which can quickly fall and recover large current in 100 μs , and there is no overshoot in the fall and recovery process. The electronic switch for transfer (such as IGBT) has small overvoltage, high reliability and easy absorption circuit in the process of switching. The scheme is a good alternative to the traditional current pit circuit.

Key words: arc current power supply; pit circuit; dynamic response; stability

PACS: 84.30.Jc; 29.25.Ni; 07.77.Ka

弧流电源是中性束注入系统辅助电源的关键组成部分^[1-3],其作用是为非线性等离子体提供高精度、低纹波的直流电源,同时,电源需具有电流转移功能以实现等离子体直流电流快速转移,且要求转移深度可调^[4],即电流打坑。中国环流器二号装置已建成的 1 MW 中性束注入辅助加热系统的弧流电源采用传统的高压隔离晶闸管相控交流调压技术^[5-6]。环流器二号的升级改造使用全新设计的 5 MW 中性束注入系统^[7],该系统采用基于超级电容的高频开关弧流电源。长期以来,用于弧流电源的打坑电路大多基于电阻式设计,通过分流的方式将部分电流消耗在转移电路中。这种方式基本满足了弧流电源正常工作时的电流转移需求,但应用过程中存在恢复振荡以及不节能等问题。有源式电流打坑电路能明显改善打坑恢复时的不稳定问题,同时大幅度减少弧流电源打坑时,电流转移带来的不必要损耗。本文提出了一种用于弧流电源的新型打坑电路解决方案,可在 150 μs 内快速实现大电流的跌落和恢复,且跌落和恢复过程中基本无过冲。

* 收稿日期:2018-11-15; 修订日期:2019-02-11

基金项目:湖南省教育厅科技计划项目(16C1369)

作者简介:周细文(1971—),男,高级工程师,主要从事大功率电力电子变流装置的研制,zhouxiwen@jsuce.com。

1 用于弧流电源的无源打坑电路

如图 1 所示,弧流电源是一种大功率直流稳流电源,一般由两部分组成。一部分是高压隔离的直流电源部分,另一部分是电流转移电路(打坑电路)部分。高压隔离的直流电源部分由可控硅、变压器、整流器和滤波电容电感组成,通过控制可控硅获得可变的电源指标。为减小直流输出纹波,变压器次级有两组绕组,一组三角形连接,另一组星形连接。两组对应绕组相差 30°,从而使直流输出端获得高质量的 12 脉整流波形,结合由电感和电容组成的 T 型滤波,输出电流的纹波小于±1%,电流的稳定度小于±1%。

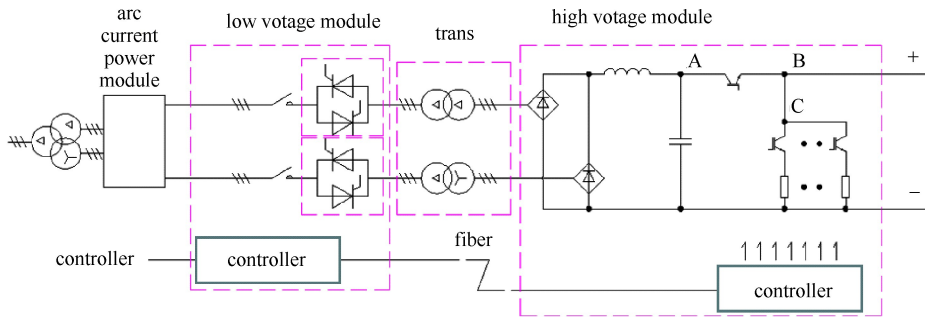


Fig. 1 Schematic diagram of arc current power supply based on resistance type pit circuit
图 1 弧流电源系统组成图

电阻式打坑电路(无源打坑电路)结构如图 2 示。无源打坑电路工作原理是:在 IGBT0 开通 A 点电流基本稳定并流向 C 路的情况下,利用 IGBT 快开关的性质,使部分电流转移到 B 路,利用 B 路并联电阻串消耗部分能量,然后,配合中性束其他电源的时序断开 IGBT,使电流快速转移到 C 路,完成一次打坑。具有打坑功能的弧流电源输出电流波形如图 3 所示。

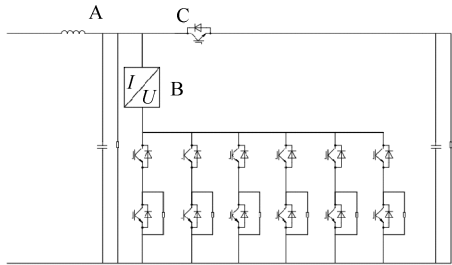


Fig. 2 Schematic diagram of pit circuit based on resistances
图 2 电阻式打坑电路原理图

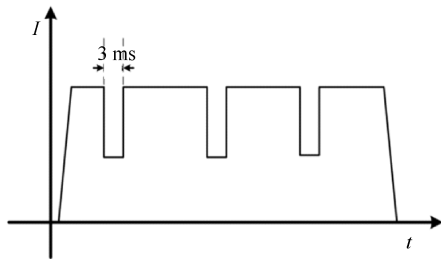
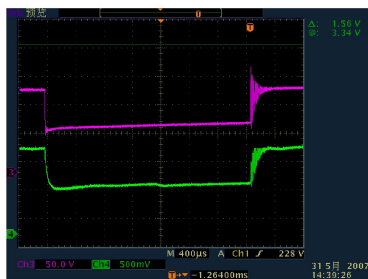


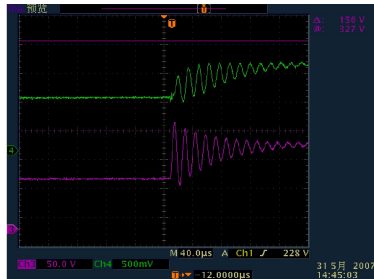
Fig. 3 Waveform of current of power supply with pit circuit
图 3 带打坑特性的弧流电源输出电流波形

电流转移的比例(B 路电流 I_B 与 A 路电流 I_A 的比)称为打坑深度,IGBT 开通时间称为打坑宽度(一般为 1~3 ms)。打坑深度由多个 IGBT 管编码与电阻大小确定,打坑精度由 IGBT 管的数量确定。以 n 只 IGBT 管为例设计打坑电路,正常工作时,IGBT₁,IGBT₂,...,IGBT_n断开达到电路控制的要求,实现稳流(或稳压)控制,当电流需要转移时,电路中切入 $R_1, R_2, \dots, R_n$ 其中一路或几路^[8]。

电阻式打坑电路工作时具有如下特点:能量通过电阻进行消耗,从而带来系统不必要的损耗;电路打坑时,电阻及其连接线路都存在寄生电感^[9],电流不能快速变化、转移及恢复;IGBT 关断时,线路寄生电感在 IGBT



(a) waveform of one-pit in resistance pit circuit



(b) amplified current and voltage waveforms

Fig. 4 IGBT voltage waveform in resistance pit circuit

图 4 电阻式打坑电路 IGBT 关断电压波形

的 CE 两极产生较大的过电压,容易损坏,必须加吸收电容,吸收电容和寄生电感相互作用,在电流跌落和恢复时容易产生振荡,图 4(a)为实验测得的电阻式打坑电路 IGBT 波形,图 4(b)为放大后,打坑结束电流恢复时的振荡波形图。

2 用于弧流电源的新型有源打坑电路

针对电阻式无源打坑电路的缺点,本文提出一种桥式可逆斩波打坑电路(有源打坑电路)。基于新型有源打坑电路的弧流电源系统如图 5 所示。系统同样由两大部分组成:用于直流稳压的主电路 U_1 和用于电流转移的打坑电路 U_2 。主电路拓扑同样采用简单高效的 BUCK 型开关电源结构^[10], A_1, B_1 为单相交流电输入, T_1 为高压隔离变压器, B_1 为恒流充电装置,第一电容 C_1 为超级电容,第二电容 C_2 , 第三电容 C_3 为直流支撑电容。高压隔离变压器 T_1 原边绕组 N_1 连接单相交流电输入 A, B; 第一副边绕组 N_2 连接第一整流装置 A_1 , 第二副边绕组 N_3 接第二整流装置 A_2 ; A_1, A_2 为不可控整流装置。第一整流装置 A_1 连接恒流充电装置 B_1 , 恒流充电装置 B_1 两输出端之间并联有第一、第三电容和第一电路结构 U_1 , 第一电容 C_1 为超级电容, 第三电容 C_3 为直流支撑电容。第二整流装置 A_2 输出端之间并联有第二电容 C_2 和第二电路结构 U_2 。

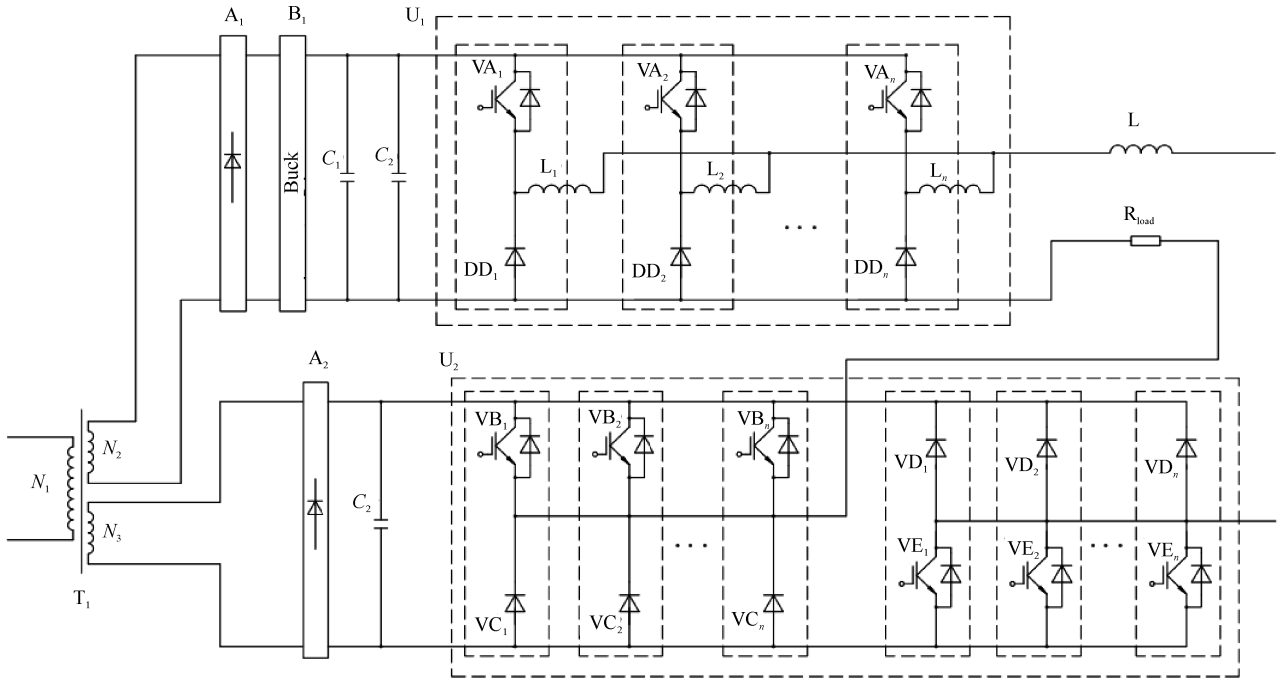


Fig. 5 Schematic diagram of arc current power supply based on a new type of pit circuit

图 5 基于新型打坑电路的弧流电源原理图

第一电路结构 U_1 主要由 $n(n > 1, n$ 为整数) 个上管 IGBT、下管二极管的反串联结构并联, 第二电路结构 U_2 由 $m(m \geq 1, m$ 为整数) 个 H 桥电路结构并联; $VA_1, VA_2, \dots, VA_n, VB_1, VB_2, \dots, VB_m$ 和 $VE_1, VE_2, \dots, VE_m$ 分别为 IGBT 模块管; $DD_1, DD_2, \dots, DD_n, VC_1, VC_2, \dots, VC_m$ 和 $VD_1, VD_2, \dots, VD_m$ 为二极管, 其中 m 和 n 的数量由弧流电流的大小决定。各 IGBT 管 VA_i 和各二极管 $DD_i (i = 1, \dots, n)$ 的串联点分别经一电感后连接在一起并连接至输出回路中的输出电感 L 的一端, 各二极管 DD_i 的正极连接负载 R_{load} 的一端。H 桥电路结构的左桥臂由上管 IGBT 管 VB_j 、下管二极管 $VC_j (j = 1, \dots, m)$ 的反串联结构组成, 各串联点连接负载 R_{load} 的另一端, 右桥臂由上管二极管 VD_j 、下管 IGBT 管 VE_j 的反串联结构组成, 各串联点连接输出电感 L 的另一端。

充电过程: A, B 单相交流电输入, 一路经高压隔离变压器 T_1 、第一整流装置 A_1 、恒流充电装置 B_1 给第一电容 C_1 充电, 直到第一电容 C_1 达到设定的直流电压时停止。另一路经高压隔离变压器 T_1 、第二整流装置 A_2 后, 直接接在第二电容 C_2 上。

正常工作过程: 控制第一电路结构 U_1 实现对负载的稳流(或稳压)的要求, 同时控制第二电路结构 U_2 , 可以使电流上升和下降时间更快。

打坑工作过程: 当需要打坑时, 对第一电路结构 U_1 进行错相控制, 等效提高了系统的开关频率, 从而提高

电流的调节速度,降低了恒流电感;对第二电路结构 U_2 进行控制,VB 组、VE 组 IGBT 管同时导通或同时关断,在电压下降时,第二电路结构 U_2 等效将一个反向电压串在输出回路中,加快电流的快速转移,电流恢复时,第二电路结构 U_2 等效将一个正向电压串在输出回路中,从而加快电流恢复能力,协调控制第一电路结构 U_1 和第二电路结构 U_2 ,可实现打坑时负载的稳流(或稳压)的要求。在电流下降到和恢复到预设值之后,控制第二电路结构 U_2 输出零电压,避免电流过冲和振荡。

3 系统仿真

根据主电路拓扑和元器件理论计算,利用 Matlab 的 Simulink 工具建立打坑电路仿真,图中省去了弧流电源的主电路部分。仿真模型中,输入直流电压设定为 200 V,输出电压 150 V,电流 1500 A,打坑深度 70%,打坑宽度 30 ms,每一组输出控制 IGBT 开关频率为 20 kHz。仿真模型如图 6 所示。

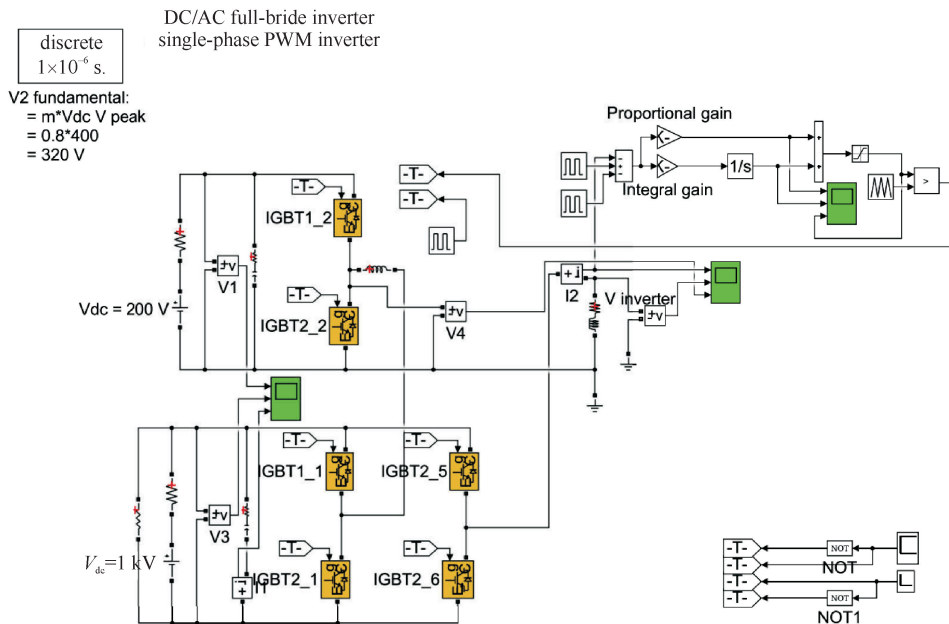


Fig. 6 Matlab simulation model of pit circuit

图 6 打坑电路 Matlab 仿真模型

图 7 为充放电及一次打坑的输出电压、电流波形。图 7 上下分别为负载电流、电压波形,仿真全过程完成一次打坑。由图可知,输出电流在启机时能迅速达到稳态,打坑过程的下降及恢复过程动态响应符合预期。由电压下降及恢复过程可以明显看出打坑时利用反压完成电流快速转移的过程。

图 8 为启机时电流上升到稳态的放大波形,可以看出,在电路开始工作不到 120 μ s,电路已经达到稳定状态,基本无过冲、振荡。图 9 为电路达到稳定以后的放大电流波形,可以看出,电流纹波约为 $\pm 0.5\%$,由纹波特性也可以看出电流的等效工作开关频率为 200 kHz。



Fig. 7 Output current and voltage waveform at single pit

图 7 一次打坑时的输出电流电压波形

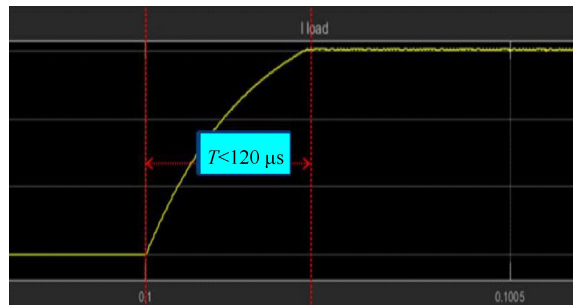


Fig. 8 Process of stabilizing current

图 8 电流达到稳定过程图

图 10,11 分别为打坑部分电流下降及恢复过程中的输出电流波形,从图中可知,电流波形下降时间更快,在不到 20 μ s 即可深度打坑,恢复时间同样在 20 μ s 左右。

以上仿真波形表明此控制电路可以使等离子弧流电流稳定输出,并且可以使系统瞬时完成深度打坑,同时具有良好的动态响应和稳态性能。

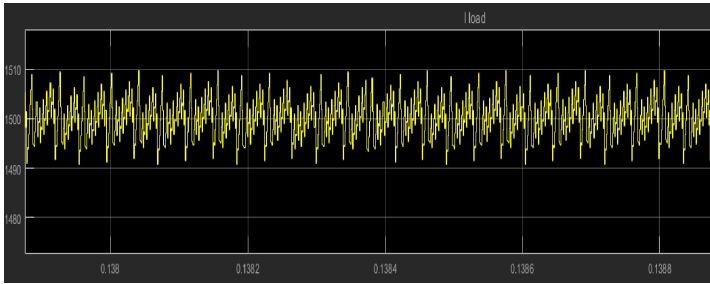


Fig. 9 Current ripple when the working current is 1500 A

图 9 设定工作电流为 1500 A 时的电流纹波

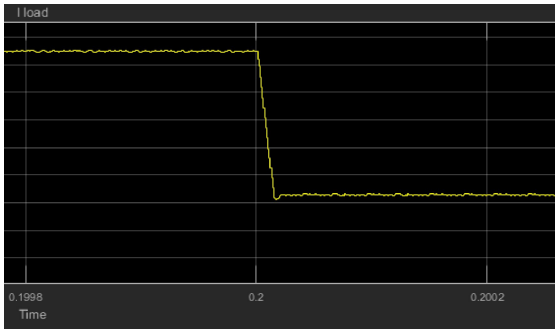


Fig. 10 Current falling edge of pit circuit

图 10 打坑下降到 450 A 的电流波形图

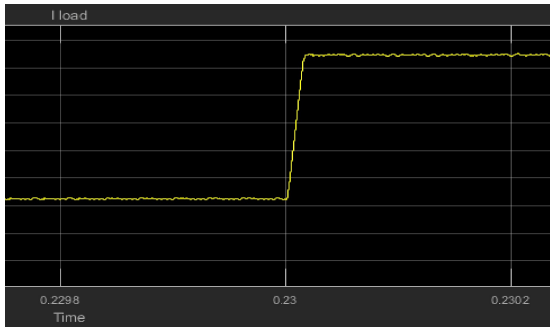


Fig. 11 Current rising edge of pit circuit

图 11 打坑上升到 1500 A 时的电流波形

4 实验结果

根据 Matlab 仿真模型及电路参数,完成了基于有源打坑电路的弧流电源系统设计和样机制造,并对关键波形进行了实验室测试,关键性能基本与仿真结果相符。

样机设置为输出电压 150 V,输出电流 1500 A。电路完成一次打坑,打坑宽度 3 ms,深度 80%,即打坑时电流需下降到 300 A。图 12~13 分别为启机时(打坑恢复时)的电流动态响应性能。由图 12 知,电流到达稳态的时间约为 120 μ s;由图 13 知,电流超调量小于 3%,且输出电流无振荡,与仿真结果吻合。

图 14 为 1500 A 输出电流稳态工作时的电流纹波,可以看出,输出电流纹波约为 $\pm 0.75\%$,与仿真结果吻合。

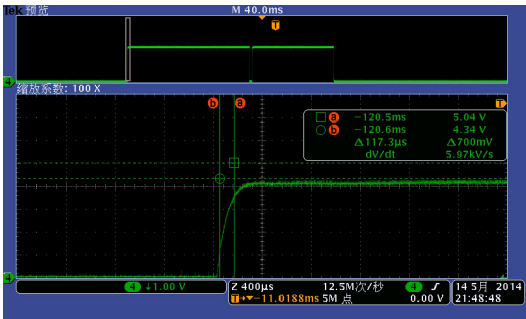


Fig. 12 Process of reaching the steady state of the output current

图 12 输出电流到达稳态的过程

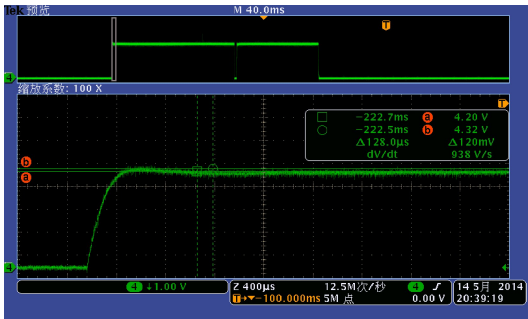


Fig. 13 Overshoot of output current

图 13 输出电流超调量

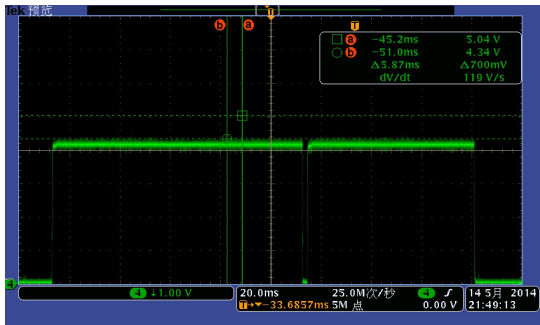


Fig. 14 Ripple of output current

图 14 输出电流纹波

5 结 论

本文介绍了一种基于一种桥式可逆斩波的新型电流转移电路,通过详细的理论介绍、仿真模型搭建及实验结果验证,新型电流转移电路相比传统电阻式打坑电路具有如下优势:

打坑时,能量是转移储存到超级电容和支撑电容上,不是消耗,从而提高了打坑效率。

电阻打坑时,电阻和线路有寄生电感,电流不能快速变化,电阻和线路的寄生电感使电流不能快速变化。本弧流电源电流是经过低感叠层母排,利用 IGBT 快速开关,在正向电流上串一个反向电压,同时利用前端 U_1 的快速调节能力,从而实现电流快速下降;快速恢复时, U_2 单元输出一个正向电压,同时利用前端 U_1 的快速调节能力,从而实现电流的快速恢复,同时在恢复后快速将 U_2 单元的电压调速为零,从而避免电流过冲和振荡。

本电路中的所有 IGBT 和快速二极管与电容和吸收电容都通过 BUSBAR 联接,能很好地吸收开关过电压,降低了 IGBT 电压应力,从而大大提高了器件的可靠性;并且吸收电容对电流转移和恢复不产生影响。

参考文献:

- [1] 周成,陶洪亮,曹洋,等. 弧流电源及其控制系统的设计[J]. 大功率变流技术, 2014(5):58-62. (Zhou Cheng, Tao Hongliang, Cao Yang, et al. Design of arc power supply and its control system. Control and Information Technology, 2014(5):58-62)
- [2] 刘小革. 我国核聚变研究中性束注入技术取得重大突破[N]. 四川日报, 2000-11-11. (Liu Xiaoge. Significant breakthrough in neutral beam injection technology for nuclear fusion research in China. Sichuan Daily, 2000-11-11)
- [3] 王保华,陈长琦. 中性束注入(NBI)装置离子源性能测试[C]//中国真空学会 2006 年学术会议. 2006. (Wang Baohua, Cheng Changqi. Performance test of ion source in neutral beam injection (NBI) device//2006 Academic Conference of China Vacuum Society. 2006)
- [4] 陈文光,饶军,李波,等. 中性束注入强流离子源放电电源及其时序控制[J]. 高压电技术, 2011,37(6):1452-1458. (Chen Wenguang, Rao Jun, Li Bo, et al. Discharge power supply and timing control of neutral beam injection high current ion source. High Voltage Engineering, 2011, 37(6):1452-1458)
- [5] 王德泰,钱家涓,赵志民,等. HL-1M 中性束注入器弧流电源的研制[J]. 电力电子技术, 1997(3):46-48,44. (Wang Detai, Qian Jiamei, Zhao Zhimin, et al. Development of arc flow power supply for HL-1M neutral beam injector. Power Electronics, 1997(3) :46-48,44)
- [6] 陈燕. 高储能器件薄膜电极制备与研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (Chen Yan. Preparation and study of thin film electrode for high energy storage devices. Chengdu: University of Electronics Science and Technology of China, 2016)
- [7] 阳璞琼,宣伟民,曹建勇,等. 基于超级电容储能的中性束注入系统弧电源设计[J]. 原子能科学技术, 2015,49(1):166-170. (Yang Pu-qiong, Xuan Weimin, Cao Jianyong, et al. Design of arc power supply for neutral beam injection system based on super capacitor energy storage. Atomic Energy Science and Technology, 2015,49(1):166-170)
- [8] 阳璞琼,宣伟民,张莹,等. 5 MW 中性束弧电源 DC/DC 变换器的设计与实现[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 084003. (Design and implementation of 5MW neutral beam arc power DC/DC converter. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 084003)
- [9] 朱楠. 功率半导体模块电、热特性分析及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018(Zhu Nan. Analysis and application of electrical and thermal characteristics of power semiconductor module. Hangzhou: Zhejiang University, 2018)
- [10] 党怀东,王有云,康英,等. 基于 Buck Chopper 电路多相多重拓扑结构的直流稳流电源的设计与实现[J]. 电气传动自动化, 2009, 31(2): 26-30. (Dang Huaidong, Wang Youyun, Kang Ying, et al. Design and implementation of DC steady current power supply based on Buck Chopper circuit with multiphase and multiple topology. Electric Drive Automation, 2009, 31(2):26-30)