



·粒子束及加速器技术·

HIAF-BRing 快循环全储能脉冲电源高低压 切换控制及其切换点平滑算法*

李 源^{1,2}, 吴凤军¹, 黄玉珍¹, 王晓俊¹, 谭玉莲¹, 张华剑¹, 朱芳芳¹,
李雨航^{1,2}, 王 洁^{1,2,3}, 郭世鼎^{1,2,3}, 石 峰^{1,2,3}, 燕宏斌¹, 高大庆¹

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学 核科学与技术学院, 北京 100049;
3. 兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000)

摘 要: 应用于强流重离子加速器装置增强环(HIAF-BRing)的快循环全储能脉冲电源需要在极宽的输出电压范围内保持极高的控制精度,为此电源采用了高压功率单元和低压功率单元串联的拓扑方式,在低压段采用低压功率单元,电压升高之后切换到高压功率单元,通过高低压切换控制来实现电流全阶段的高精度输出。但是在样机实测中发现存在切换点的振荡问题,导致切换点处的输出电流绝对误差无法满足指标要求。本文提出了一种切换点平滑控制算法来平滑处理切换点占空比,给出了仿真结果,并且在 HIAF-BRing 快循环全储能脉冲电源样机上面实际验证了高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的有效性。实验结果表明:100 A 注入平台的输出电流绝对误差由 ± 500 mA 降至 ± 50 mA,100 A 注入平台的切换点处输出电流绝对误差由 ± 1.16 A 降至 ± 120 mA,100 A 注入平台输出精度较低的问题得以解决。

关键词: 快循环全储能;脉冲电源;宽输出电压范围;注入平台;高低压切换控制;切换点平滑控制

中图分类号: TL503.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230037

High voltage and low voltage switching control and switching point smoothing algorithm of HIAF-BRing fast cycle full energy storage pulse power supply

Li Yuan^{1,2}, Wu Fengjun¹, Huang Yuzhen¹, Wang Xiaojun¹, Tan Yulian¹, Zhang Huajian¹, Zhu Fangfang¹,
Li Yuhang^{1,2}, Wang Jie^{1,2,3}, Guo Shiding^{1,2,3}, Shi Feng^{1,2,3}, Yan Hongbin¹, Gao Daqing¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The fast cycle full energy storage pulse power supply for the High Intensity heavy ion Accelerator Facility-Booster Ring (HIAF-BRing) needs to maintain extremely high control accuracy in a very wide range of output voltage. For this reason, the power supply adopts the topology of high voltage power units and low voltage power unit in series. The low voltage power unit is used in low voltage stage, after voltage rises, it is switched to high voltage power units, thus high precision output of current at all stages is realized through high voltage and low voltage switching control. However, in the test of prototype, it is found that there is an oscillation problem at switching point, resulting in that the absolute error of output current at switching point cannot meet the requirements. In this paper, a switching point smoothing control algorithm is proposed to smooth switching point duty cycle, and the simulation results are given. The effectiveness of high voltage and low voltage switching control method and its switching point smoothing control algorithm is verified on the HIAF-BRing fast cycle full energy storage pulse power supply

* 收稿日期:2023-01-23; 修订日期:2023-03-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0405402)

联系方式:李 源, liyuan@impcas.ac.cn。

通信作者:吴凤军, wufengjun@impcas.ac.cn。

prototype. The experimental results show that the absolute error of output current of 100 A injection platform is reduced from ± 500 mA to ± 50 mA, the absolute error of output current at switching point of 100 A injection platform is reduced from ± 1.16 A to ± 120 mA, and the problem of low output accuracy of 100 A injection platform is solved.

Key words: fast cycle full energy storage, pulse power supply, wide output voltage range, injection platform, high voltage and low voltage switching control, switching point smoothing control

强流重离子加速器设施(HIAF)是中国科学院近代物理研究所承担的国家“十二五”重大科学工程,建成后 will 提供国际上脉冲流强最高的重离子束流^[1-8]。为了克服空间电荷效应和强流动态真空效应的影响,HIAF的束流需要快速加速到高能来避免丢失^[9]。因此,要求 HIAF-BRring 二极铁电源输出快速、高精度的大电流和宽范围的高压^[10-11]。为此,项目组设计了快循环全储能脉冲电源,采用基于功率单元的串并联方式来实现大功率输出,为了在极宽输出电压范围内保持高精度输出,该电源采用基于高压功率单元和低压功率单元串联的拓扑,配合高低压切换控制实现全段电流的高精度输出。但是样机实测发现在 100 A 注入平台结束点,即高低压切换控制的切换点处存在振荡,该振荡幅值较大,无法达到输出精度的要求。而对于 HIAF-BRring 来说,100 A 注入平台及其高低压切换点对应束流的注入过程,对电流的精度要求很高,是影响整个加速器性能的关键。因此,切换点的振荡问题亟待解决。

针对以上问题,本文首先介绍 HIAF-BRring 快循环全储能脉冲电源并说明其 100 A 注入平台输出电流精度低的原因,继而介绍高低压切换控制方法并引出高低压切换点的振荡问题。在此基础上,详细介绍切换点平滑控制算法。最终通过 PLECS 仿真和在 HIAF-BRring 快循环全储能脉冲电源样机上的实验,验证了高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的有效性。

1 HIAF-BRring 快循环全储能脉冲电源及其高低压切换控制方法的设计

1.1 HIAF-BRring 二极铁电源的参数和输出波形

HIAF-BRring 二极铁电源的参数如表 1 所示,输出电流、输出电压和输出功率波形如图 1 所示。

表 1 HIAF-BRring 二极铁电源的参数

Table 1 Parameters for HIAF-BRring dipole magnet power supply

magnet inductance/mH	magnet resistance/m Ω	maximum current/A	maximum voltage/V	current rise rate/(kA·s ⁻¹)	current tracking absolute error/mA	current platform absolute error/mA
116	36.4	3900	4618	$\geq \pm 38$	$\leq \pm 200$	$\leq \pm 200$

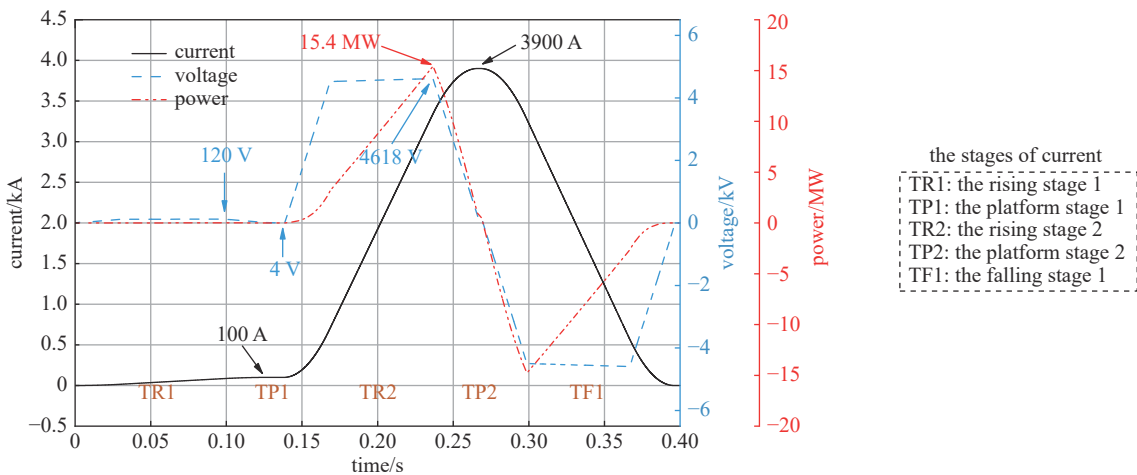


Fig. 1 Output current, output voltage and output power waveforms of HIAF-BRring dipole magnet power supply

图 1 HIAF-BRring 二极铁电源的输出电流、输出电压和输出功率波形

如图 1 所示,输出电流一共由上升段 1(TR1)、平台段 1(TP1)、上升段 2(TR2)、平台段 2(TP2)和下降段 1(TF1)五个阶段组成,其中 TP1 和 TP2 分别对应于加速器束流的注入和引出。在 TR2 阶段,电流需要在包含两个 30 ms 拐弯时间的 128 ms 内由 100A 上升到 3900 A,上升速率超过了 38 kA/s。整个电流阶段的跟踪绝对误差和平台绝对误差均要求小于等于 ± 200 mA。在整个 396 ms 的电流周期内,输出电压的范围为 -4594 V 至 4618 V。因

此,该电源的难度极大,在满足大功率输出的同时,还要满足快响应且高精度的电流输出。

1.2 HIAF-BRing 二极管电源 100 A 注入平台存在的精度问题

通过对 HIAF-BRing 二极管电源的输出特性和参数的分析不难发现,宽输出电压范围和 100 A 注入平台的高精度输出之间存在矛盾,需要进一步分析来帮助拓扑方案的确定。对于加速器电源,常以 H 桥的串并联为基本拓扑来实现大功率的输出^[12-14]。单个 H 桥的基本结构如图 2 所示。

对于 H 桥变换器来说,其在加速器电源中,常常只控制 S_1 和 S_4 使其成为工作于 1、4 象限的二象限倍频斩波器^[15-17]。H 桥的输出电压和输入电压的关系为

$$\frac{U_{out}}{U_{dc}} = d, 0 \leq d \leq 1 \quad (1)$$

式中: U_{out} 是输出电压; U_{dc} 是母线电压; d 是占空比。因此, H 桥为电压型变换器,输出电压和占空比成正比,通过调节占空比可以调节输出电压,并最终达到调节输出电流的目的。

对于 HIAF-BRing 二极管电源来说,为了达到 4618 V 的输出电压,最大母线电压设计为 6000 V。而 100 A 注入平台的电流为 100 A,从电流刚开始达到 100 A 以及后续 100 A 稳流对应的输出电压范围为 4 V 至 120 V,所以当输出电流在 100 A 注入平台 TP1 阶段时, H 桥的占空比范围只有 0.067% 至 2%。

大功率 H 桥常使用 1700 V/1400 A IGBT, 型号为 FF1400R17IP4, 其数据手册中的相关数据如表 2 所示。

根据数据手册提供的信息,最小的导通延迟时间和关断延迟时间分别为 0.14 μ s 和 0.77 μ s, 二者之和 0.91 μ s 约等于最小占空比对应的的时间。若设置 H 桥 IGBT 的开关频率为 5 kHz,

在倍频调制的基础上,输出的等效开关频率为 10 kHz, 那么 0.91 μ s 对应的占空比即为 0.91%。但是,最小占空比 0.91% 无法完全满足输出电流在 100 A 注入平台需要的 0.067% 至 2% 占空比范围,所以 100 A 注入平台的输出电流精度会受到 IGBT 最小占空比限制以及控制系统在小占空比时控制效果不佳的影响。

1.3 HIAF-BRing 快循环全储能脉冲电源的拓扑方案和高低压切换控制方法

针对 BRing 特殊的要求,提出了一种全开关的、基于功率单元串并联的实现方案。电源的拓扑图如图 3 所示。电源由两个支路并联而成,每个支路最大输出 2000 A,每个支路内部由六个 1100 V/2000 A 的高压功率单元和一个 200 V/150 A 的低压功率单元串联而成,在低压 H 桥的输出端并联一个续流二极管。电源在单支路内部采用了高低压切换控制。单个支路内部的所有 H 桥为级联 H 桥的拓扑形式。

为了提高 100 A 注入平台的输出精度,采用了高低压切换控制方法,即整个电流阶段分为低压功率单元输出阶段和高压功率单元输出阶段,当电流在 0~100 A 范围内时,支路内部的高压功率单元的 H 桥处于续流状态,即只开通每个 H 桥的 S_1 管,其余开关管不导通。此时输出电压全部由低压功率单元的 H 桥来承担,考虑到 100 A 平台输出电压最大处为 120 V,设置标准电压源模块的输出电压为 150 V,使得输出电流在 100 A 时的占空比处于较合适的范围内。当电流处于从 100 A 上升的拐点时,封锁低压功率单元的 H 桥 PWM 脉冲,低压功率单元被续流二极管旁路,而高压功率单元的 H 桥处于正常的斩波状态来完成大电流阶段的输出。以单支路为例,高低压切换控制方法的工作状态如图 4 所示。高低压切换控制策略如图 5 所示。

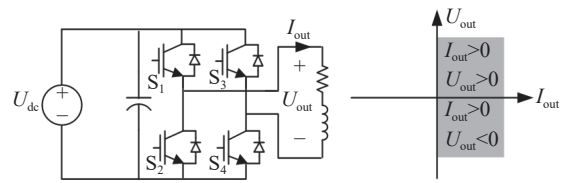


Fig. 2 Two-quadrant chopper in accelerator power supply

图 2 加速器电源中的二象限斩波器

表 2 FF1400R17IP4 的相关参数

Table 2 Related parameters of FF1400R17IP4

rise time/ μ s	fall time/ μ s
0.14	0.77

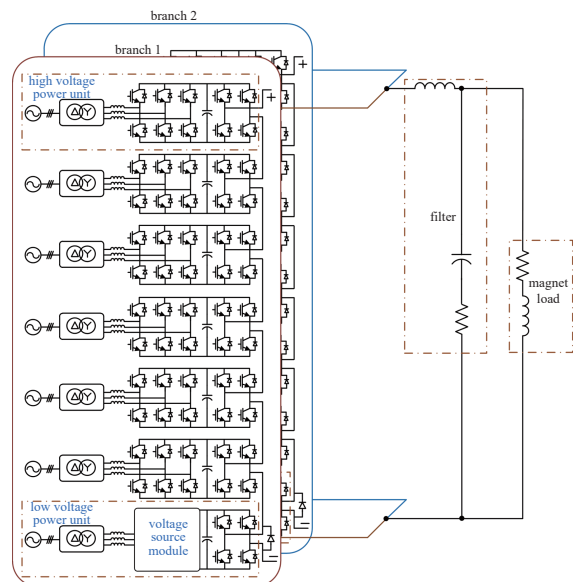


Fig. 3 Topology of HIAF-BRing fast cycle full energy storage pulse power supply

图 3 HIAF-BRing 快循环全储能脉冲电源拓扑图

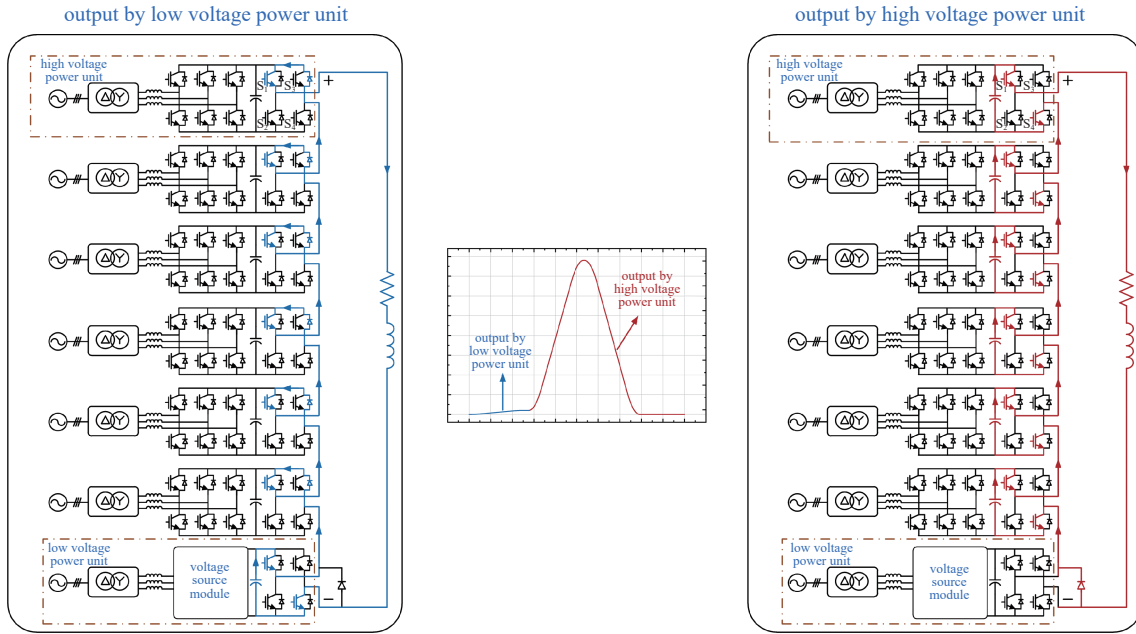


Fig. 4 Work states of high voltage and low voltage switching control method with single branch as an example

图 4 以单支路为例的高低电压切换控制方法对应的工作状态

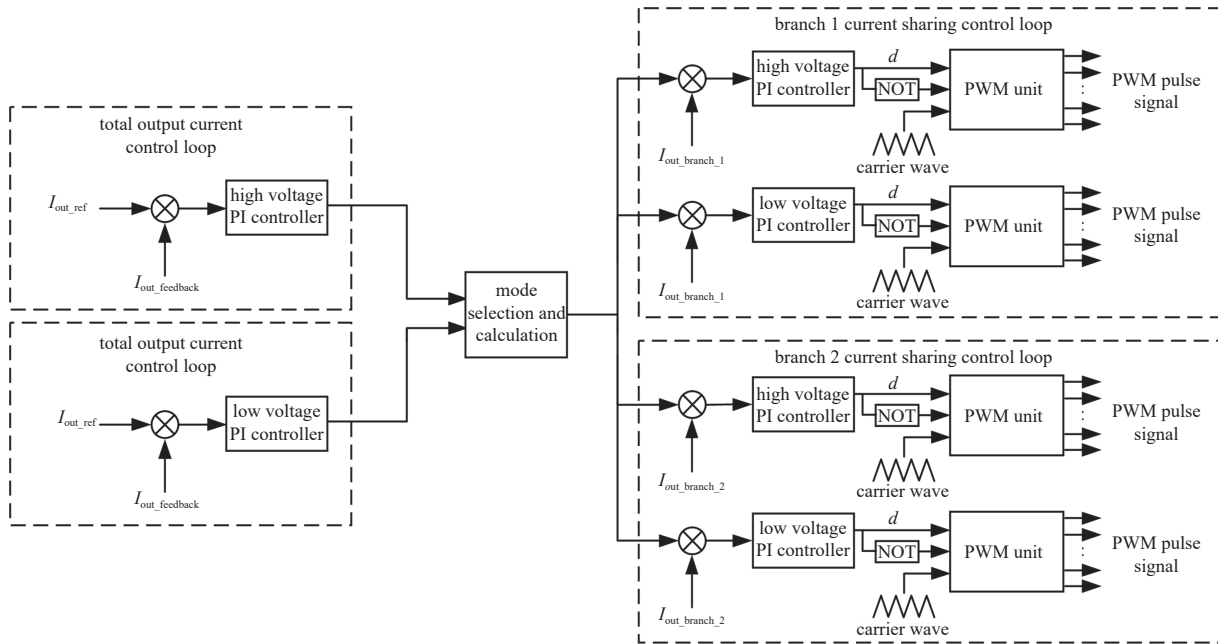


Fig. 5 High voltage and low voltage switching control strategy

图 5 高低电压切换控制策略

2 高低电压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的设计

2.1 切换点振荡问题

通过高低电压切换控制方法,可以有效改进 100 A 注入平台的调节占空比。但是在样机实际测试过程中发现,电流在 100 A 注入平台的结束点,即由低压功率单元输出切换到高压功率单元输出的切换点处存在振荡,振荡幅值为 1.16 A,使得该点的电流绝对误差远远超出 ± 200 mA 的要求。

由图 5 的高低电压切换控制策略可以看出,由于低压功率单元输出阶段和高压功率单元输出阶段对应的外环 PI 控制器不相同。因此就会出现当低压功率单元 PI 控制器调节完毕并转到高压功率单元 PI 控制器输出时,高压功率单元 PI 控制器的初始输出为 0。但此时输出电流对应 100 A,高压功率单元 PI 控制器的初始值不应该从 0 开始。初始值为 0 会导致输出电流在切换的瞬间产生振荡,使切换点处的电流误差很大。切换点处的振荡如图 6 所示。

2.2 切换点平滑控制算法

为了解决切换点振荡的问题,设计了一种切换点平滑控制算法,使得输出电流在高低压切换阶段能够平滑过渡,此算法逻辑框图如图 7 所示。

首先,当低压功率单元输出结束切换到高压功率单元输出时,根据式(2)计算高压功率单元 PI 控制器的初始值。

$$d_{\text{high}} = \frac{d_{\text{low}} U_{\text{low}}}{U_{\text{high_average}}} + d_{\text{high_0_offset}} \quad (2)$$

式中: d_{low} 为切换前低压功率单元的 H 桥占空比; d_{high} 为切换后高压功率单元的 H 桥占空比; U_{low} 为低压功率单元母线电压; $U_{\text{high_average}}$ 为所有高压功率单元母线电压的平均值; $d_{\text{high_0_offset}}$ 是高压功率单元占空比为 0 时的偏置。

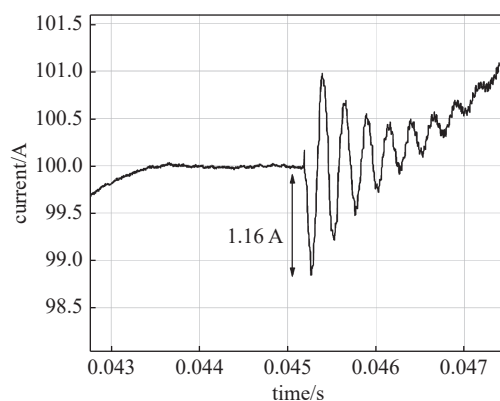


Fig. 6 Oscillation at the switching point

图 6 切换点处的振荡

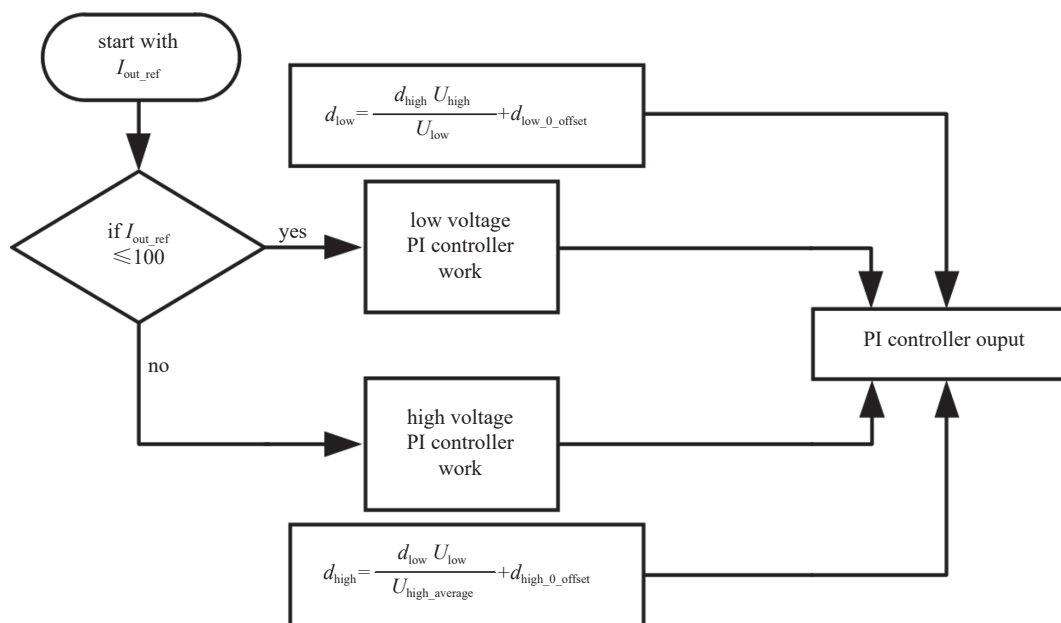


Fig. 7 Switching point smoothing control algorithm

图 7 切换点平滑控制算法

其次,当高压功率单元输出结束切换到下一次脉冲电流输出的开始,即重新为低压功率单元输出时,根据式(3)计算低压功率单元 PI 控制器的初始值。

$$d_{\text{low}} = \frac{d_{\text{high}} U_{\text{high}}}{U_{\text{low}}} + d_{\text{low_0_offset}} \quad (3)$$

式中: d_{low} 为切换后低压功率单元的 H 桥占空比; d_{high} 为切换前高压功率单元的 H 桥占空比; $d_{\text{low_0_offset}}$ 为低压功率单元占空比为 0 时的偏置。

3 高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的仿真

为了验证所提出的高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的有效性,利用 PLECS 软件进行了仿真。仿真基于图 2 的电源拓扑,仿真的具体参数与表 1 对应,其中 PWM 整流器的 IGBT 开关频率为 10 kHz; H 桥的 IGBT 开关频率为 5 kHz;负载电感为 116 mH;负载电阻为 36.4 mΩ。仿真电路图如图 8 所示,仿真的控制原理图如图 9 所示。

3.1 高低压切换控制的仿真

为了验证高低压切换控制方法,进行了高低压切换控制的仿真。在同样输出如图 1 所示的标准波形以及采用同样 PI 参数的情况下,比较加入高低压切换控制方法前后,100 A 注入平台的输出电流。需要说明的是,为了接近实际情况,模拟 IGBT 最小占空比的影响,在仿真时增加了 1% 的最小占空比限制。

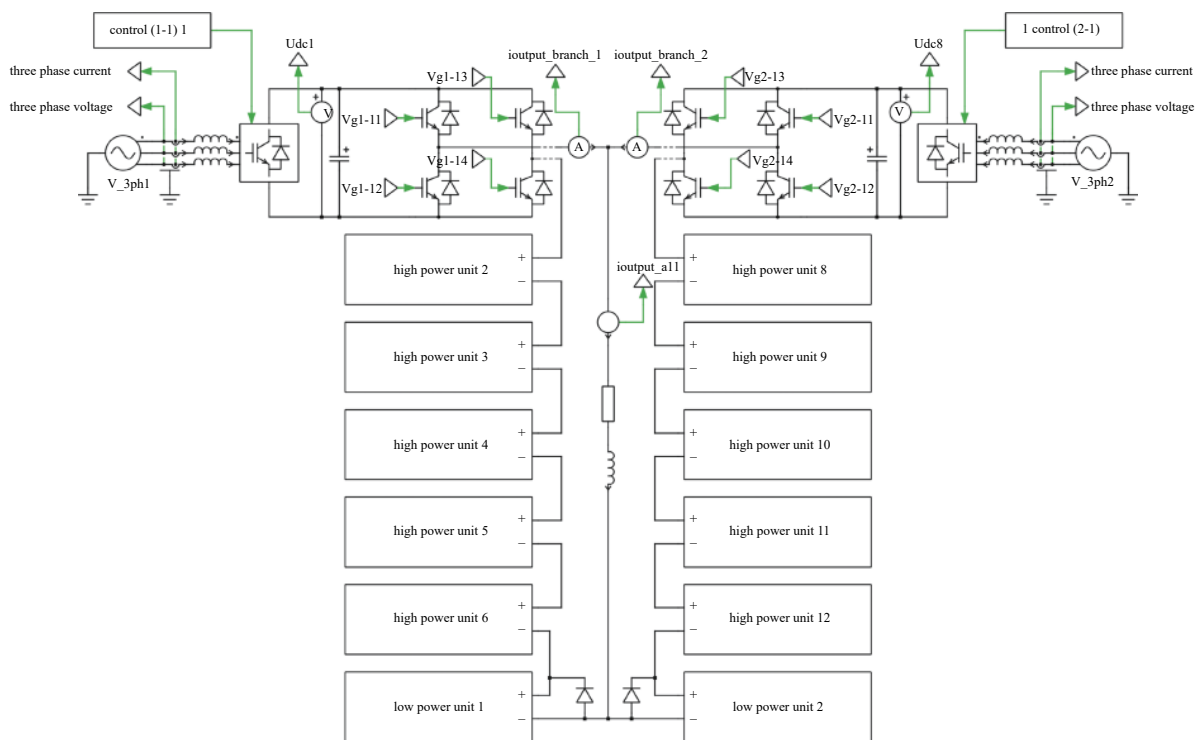


Fig. 8 Simulation circuit

图 8 仿真电路

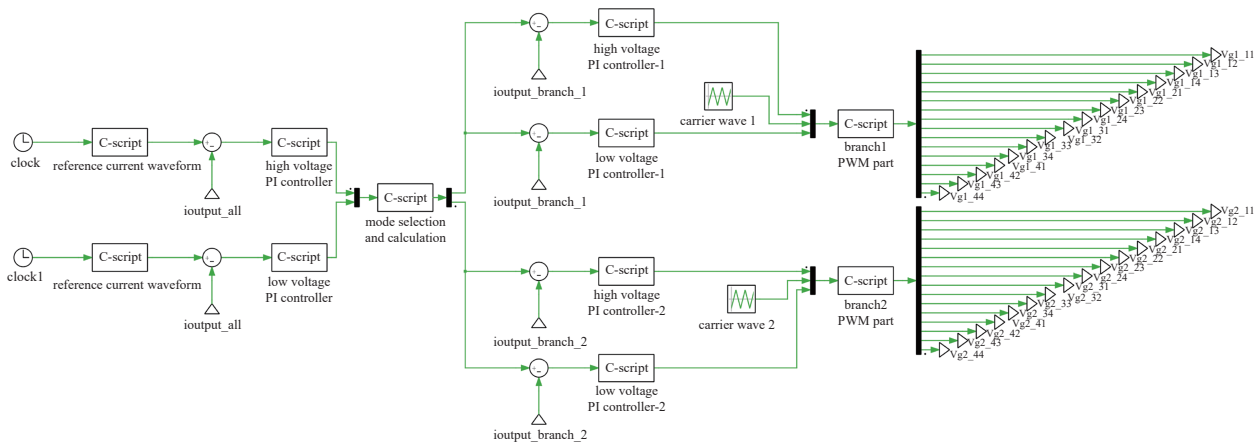


Fig. 9 Simulation control principle

图 9 仿真控制原理

得到加入高低压切换控制方法前后, 100 A 注入平台的输出电流波形, 如图 10 所示。

从图 10 中可以看出, 在没有加入高低压切换控制方法时, 100 A 注入平台的输出电流存在较大的振荡, 控制环的调节性能不佳。这是因为 100 A 注入平台处 H 桥的母线电压为 6000 V, 而输出电压只有 4 V 至 120 V, 所以占空比很低, 加之 IGBT 存在最小占空比限制以及控制系统在小占空比时控制效果不佳的问题, 导致电流在刚上升到 100 A 注入平台时的输出存在振荡, 这会直接影响 100 A 注入平台的输出电流精度。而加入了高低压切换控制方法之后, 100 A 处母线电压只有 150 V, 所以占空比约为 2% 至 80%, 因此可以获得较好的调节性能。但需要说明的是仿真的输出较为理想, 实际的输出精度无法达到仿真的级别, 但是可以用来验证算法的有效性。

3.2 切换点平滑控制算法的仿真

为了验证切换点平滑控制算法, 进行了切换点平滑控制算法的仿真。仿真时加入了高低压切换控制方法, 然后在同样输出如图 1 所示的标准波形以及采用同样 PI 参数的情况下, 比较加入切换点平滑控制算法前后的 100 A 注入平台输出电流。

得到加入切换点平滑控制算法前后, 100 A 注入平台的输出电流波形, 如图 11 所示。

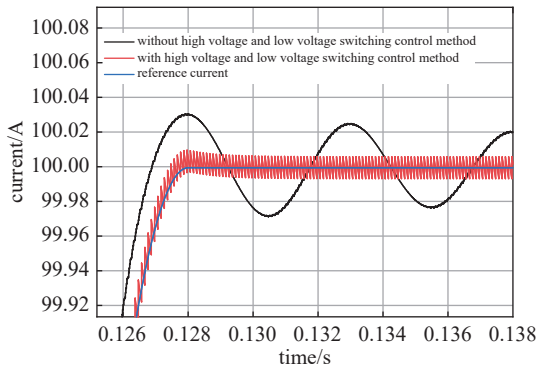


Fig. 10 Output current waveform of 100 A platform before and after adding high voltage and low voltage switching control method

图 10 加入高低压切换控制方法前后, 100 A 平台的输出电流波形

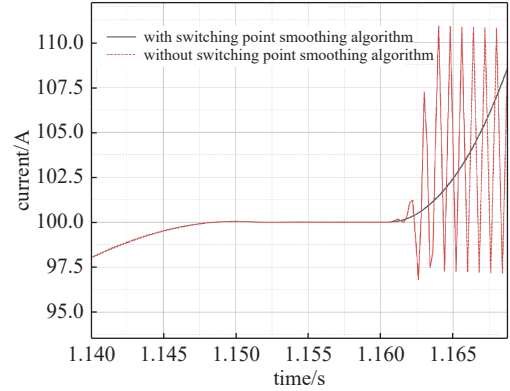


Fig. 11 Simulation comparison before and after adding switching point smoothing control algorithm under method of high voltage and low voltage switching control

图 11 在高低压切换控制方法下, 加入切换点平滑控制算法前后的仿真对比

从图 11 中可以看出, 加入切换点平滑控制算法后, 切换点处的振荡明显减小, 由切换点过渡到 TR2 上升段的过程更加平滑。

因此, 通过以上仿真, 说明高低压切换控制及其切换点平滑控制算法是有效可行的。

4 高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的实验

4.1 实验平台

本文进行的实验基于 HIAF-BRing 快循环全储能电源样机, 电源的实物图如图 12(a) 所示。电源的负载由四个 HIAF-BRing 二极铁串联组成, 负载实物图如图 12(b) 所示。实验使用的控制器为近代物理研究所加速器中心电源室开发的数字控制器^[18-21]。



(a) prototype of HIAF-BRing fast cycle full energy storage pulse power supply



(b) HIAF-BRing dipole magnet load

Fig. 12 Prototype and magnet load of HIAF-BRing fast cycle full energy storage pulse power supply

图 12 HIAF-BRing 快循环全储能脉冲电源样机和磁铁负载

4.2 实验的内容和结果

实验的具体参数为: 负载电感 116 mH; 负载电阻 36.4 mΩ; PWM 整流器 IGBT 开关频率为 10 kHz; H 桥 IGBT 开关频率为 5 kHz。单个高压功率单元 H 桥母线电压为 1000 V, 单个低压功率单元 H 桥母线电压为 150 V。实验使用的参考电流与图 1 的标准电流波形相比, 根据物理人员的要求增大了 TR1 段的时间。

在使用同样的 PI 参数的情况下, 得到加入高低压切换控制方法前后的 100 A 注入平台的实验结果如图 13 所示。

由图 13 可知, 在未加入高低压切换控制方法时, 100 A 注入平台呈现较大的振荡, 绝对误差达到±500 mA, 远大于指标要求的±200 mA。在加入高低压切换控制方法后, 100 A 注入平台的绝对误差明显减小, 输出电流绝对误差降至±50 mA, 满足指标要求, 因此验证了高低压切换控制方法的有效性。

除此之外, 基于高低压切换控制方法, 在使用同样的 PI 参数的情况下, 得到加入切换点平滑控制算法前后的实验结果, 如图 14 所示。

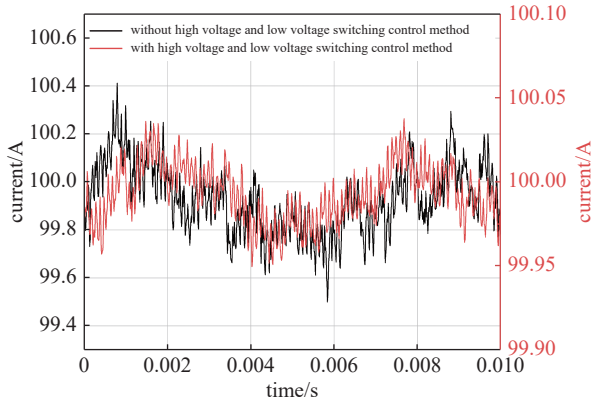


Fig. 13 Experimental results of 100 A platform current before and after adding high voltage and low voltage switching control method
图 13 加入高低压切换控制方法前后的 100 A 注入平台的实验结果

由图 14 可知,在有高低压切换控制方法的情况下,加入切换点平滑控制算法前切换点处的最大振荡幅值为 1.16 A,无法满足电流绝对误差小于等于 ± 200 mA 的要求。加入切换点平滑控制算法后切换点处的最大振荡幅值为 0.12 A,对应输出电流绝对误差为 ± 120 mA,满足小于等于 ± 200 mA 的指标要求。

因此,在高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法的作用下,使得 100 A 注入平台 TP1 段的电流绝对误差满足要求,从而使所有电流阶段均满足电流绝对误差的指标要求。得到电源的总输出电流波形和绝对误差波形如图 15 所示。

由图 15 可知,输出电流可以准确快速的跟踪给定电流,对于有指标要求的 TP1、TR2、TP2 段来说,电流绝对误差均满足小于等于 ± 200 mA 的指标要求。

5 结论

本文提出了一种高低压切换控制方法及其切换点平滑控制算法来解决 HIAF-BRring 快循环全储能脉冲电源 100 A 注入平台输出精度较低以及高低压切换点处振荡的问题。从理论上分析了 100 A 注入平台的输出电流精度会受到 IGBT 最小占空比限制以及控制系统在小占空比时控制效果不佳的影响,详细介绍了高低压切换控制方法和切换点振荡问题,并给出切换点平滑控制算法的思路和方案,最终在 HIAF-BRring 快循环全储能脉冲电源样机上得到成功实现,成功将 100 A 注入平台的输出电流绝对误差由之前的 ± 500 mA 降至 ± 50 mA,并且使切换点处的振荡幅值由 ± 1.16 A 降至 ± 0.12 A,圆满解决了注入平台控制精度及高低压切换点的振荡问题。HIAF-BRring 快循环全储能脉冲电源已在 2022 年 10 月通过专家组测试,电源进入批量加工阶段。

参考文献:

- [1] Yang Jiancheng, Xia Jiawen, Xiao Guoqing, et al. High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF) in China[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, 317: 263-265.
- [2] Li Peng, Yuan Youjin, Yang Jiancheng, et al. The collimation system design for the Booster Ring in the HIAF project[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 920: 14-21.
- [3] 肖国青,徐珊珊,王思成. HIAF及CiADS项目进展与展望[J]. *原子核物理评论*, 2017, 34(3): 275-283. (Xiao Guoqing, Xu Hushan, Wang Sicheng, et al. HIAF and CiADS National Research Facilities: Progress and Prospect[J]. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(3): 275-283)
- [4] Mao Lijun, Yang Jiancheng, Gao Daqing, et al. Status of the HIAF accelerator facility in China[C]//27th Russian Particle Accelerator Conference. 2021: 23-27.
- [5] Gao Yunzhe, Ruan Shuang, Wang Geng, et al. The multi-phased beam dump scheme in BRing at the HIAF[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2022, 6(1): 111-121.
- [6] Zheng Wenheng, Yang Jiancheng, Li Peng, et al. Design of proton beam collimation system for HIAF-BRring[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*,

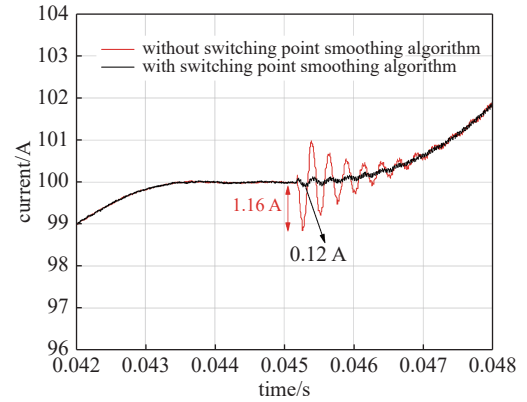


Fig. 14 Experimental results of 100 A platform before and after adding the switching point smoothing control algorithm
图 14 加入切换点平滑控制算法前后的实验结果

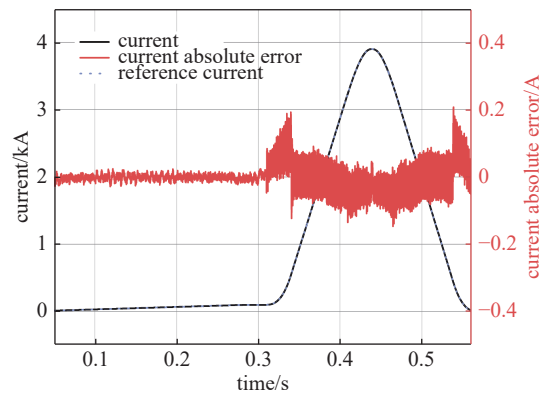


Fig. 15 Total output current waveform and current absolute error waveform of power supply
图 15 电源的总输出电流波形和电流绝对误差波形

2022, 6(4): 519-529.

- [7] Ren Hang, Yang Jiancheng, Shen Guodong, et al. A new multi-turn beam dump scheme design and simulation for HIAF-BRing machine protection[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2022, 6(4): 530-539.
- [8] 阮爽, 杨建成, 任航, 等. 强流重离子加速器装置的增强器慢引出系统[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 105104. (Ruan Shuang, Yang Jiancheng, Ren Hang, et al. Slow extraction system for booster ring at HIAF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 105104)
- [9] Chen Xiaoqiang, Yang Jiancheng, Xia Jiawen, et al. Study of eddy current effect in BRing at HIAF[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 920: 37-42.
- [10] 高大庆, 周忠祖, 吴凤军, 等. 强流重离子加速器装置电源预研及进展[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(10): 2048-2054. (Gao Daqing, Zhou Zhongzu, Wu Fengjun, et al. R&D progress of HIAF power supply system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(10): 2048-2054)
- [11] Li Yuan, Wu Fengjun, Wang Xiaojun, et al. Structure and reliability design and experiment of HIAF-BRing dipole magnet pulse power supply[C]//IEEE International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). 2021: 1-6.
- [12] Péron R, Bordry F, Burnet J P, et al. A 60MW pulsed power supply for particle accelerator: preliminary test results[C]//EPE-PEMC 2010. 2010.
- [13] Shimogawa T, Kurimoto Y, Morita Y, et al. A control system of new magnet power converter for J-PARC main ring upgrade[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(7): 1236-1241.
- [14] Sato H, Shintomi T, Koseki K, et al. Upgrade scheme for the J-PARC main ring magnet power supply[C]//European Particle Accelerator Conference. 2006: 2679-2681.
- [15] 吴凤军. 空间矢量PWM整流技术在重离子加速器电源中的研究与应用[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2016: 40-44. (Wu Fengjun. Research and application of space vector PWM rectification technology in the heavy ion accelerator power supply[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016: 40-44)
- [16] Wu Fengjun, Gao Daqing, Shi Chunfeng, et al. A new type of accelerator power supply based on voltage-type space vector PWM rectification technology[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 826: 1-5.
- [17] 王进军. 加速器电源的数字化研究与设计[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2009: 11-28. (Wang Jinjun. Digital power supply for accelerator researching and design[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2009: 11-28)
- [18] 黄玉珍. 基于FPGA的数字电源调节器研究与设计[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2010: 11-26. (Huang Yuzhen. Research and design of digital power supply regulator based on FPGA[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2010: 11-26)
- [19] 谭玉莲. HIAF-BRing电源样机数字控制器设计和实现[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2021: 23-69. (Tan Yulian. Design and implementation of power supply prototype digital controller in HIAF-BRing[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021: 23-69)
- [20] Li Yuhang, Wang Xiaojun, Wu Fengjun, et al. Design of HIAF module power supply control board[C]//IEEE International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). 2021: 1-4.
- [21] 谭玉莲, 吴凤军, 王晓俊, 等. HIAF-BRing电源样机模块故障联锁保护系统设计与实现[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 074002. (Tan Yulian, Wu Fengjun, Wang Xiaojun, et al. Design and implementation of module fault interlock and protection system of HIAF-BRing power supply prototype[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 074002)