



kA 级双阶梯脉冲电源方案设计与分析*

陈俊宏¹, 肖东华², 熊玉珍², 王英翘¹, 陈小昌², 宣伟民¹, 戢洋¹

(1. 核工业西南物理研究院 聚变科学所, 成都 610041; 2. 南昌大学 物理与材料学院, 南昌 330031)

摘 要: 托卡马克装置预电离过程中, 环向磁场应与电子回旋波频率相匹配, NCST 装置现有的电子回旋波频率较低, 为了让环向场与已有的电子回旋波频率匹配, 提出新的环向场线圈电流产生方案, 在原方案的磁场线圈平顶电流产生之前增加一个低电流台阶。回顾 NCST 球形托卡马克装置环向场线圈电源的原有方案后, 设计了全控型和半控型两种方案, 从电压电流的高次谐波、电流的可控性和纹波、改动成本和安装便捷性四方面对比两个方案的优缺点, 最终选定半控型改造方案。根据现场条件制作电源改造柜, 尽量减少对原有电源柜的改动。实际测试结果显示, 两个电流台阶衔接正常, 低电流台阶宽度可调、幅值可调, 满足改造要求。

关键词: NCST; 球形托卡马克装置; 环向场线圈电源; 预电离; 双阶梯脉冲电流

中图分类号: TM461.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230243

Design and analysis of kA stepped pulse current generation scheme

Chen Junhong¹, Xiao Donghua², Xiong Yuzhen², Wang Yingqiao¹, Chen Xiaochang², Xuan Weimin¹, Ji Yang¹

(1. Center for Fusion Science, Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China;

2. School of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Toroidal magnetic field should match frequency of the electron cyclotron wave in pre-ionization process of the Tokamak device. The existing electron cyclotron wave frequency of the NCST (Nanchang Spherical Tokamak) is low. A new toroidal coil current generation scheme is proposed to match the current electron cyclotron wave frequency. A low current step is added before the existing flat top current of original scheme. After reviewing the original scheme of the toroidal coil power supply of NCST, two schemes of full control and semi-control are designed. Advantages and disadvantages of the two schemes are compared from four aspects: high order harmonics of voltage and current, controllability and ripple of current, modification cost and installation convenience, and finally the semi-control transformation scheme is selected. The power supply cabinet is modified according to the field conditions with minimum alteration. Actual test results show that the two current steps are connected normally, and the width and amplitude of low current steps are adjustable, which meets the transformation requirements.

Key words: NCST, spherical tokamak, toroidal field power supply, preionization, double-step pulse current

受限于中大型托卡马克装置的昂贵建造、养护成本^[1-2], 人员调配困难和成本有限的公司或学校首选球形托卡马克的方案, 例如中国第一家研究聚变能源的私营企业新奥集团于 2019 年 8 月建成球形托卡马克装置“玄龙-50”并首次放电^[3-4]。清华大学工程物理系于 2002 年率先建成 SUNIST“中国联合球形托卡马克”^[5]。出于科研和教学的目的, 南昌大学于 2016 年启动建设球形托卡马克装置“NCST(Nan Chang Spherical Tokamak)”, 2020 年 11 月 28 日正式启用, 该装置环向场线圈主要参数是^[6]: 大半径为 0.40 m; 小半径为 0.24 m; 环向场为 0.36 T; 环向场线圈匝数为 32。该装置配备了 2.45 GHz 电子回旋系统用于预电离, 为匹配现有的电子回旋波频率, 提出新的环向场建立方案。本文主要内容是设计 NCST 球形托卡马克装置的环向场线圈电源改造方案, 分析各方案的优缺点。

1 环向场电流波形

电子回旋波加热和电流驱动是磁约束聚变装置和未来托卡马克反应堆中辅助加热和控制等离子体特性的重

* 收稿日期: 2023-07-31; 修订日期: 2023-10-13

基金项目: 四川省科技计划项目 (2021JDTD0022, MZGC20230009)

联系方式: 陈俊宏, chenjh@swip.ac.cn。

要手段之一^[7], 电子回旋波频率与环向磁场的关系为^[8-9]

$$f(\text{GHz}) = \frac{eB}{2\pi m_e} \approx 28B(\text{T}) \quad (1)$$

式中: f 是电子回旋波频率, m_e 是电子质量, B 是托卡马克环向场。NCST 装置现有的电子回旋波频率为 2.45 GHz, 对应环向磁场为 0.0875 T, 是装置正常工作所需 (0.36 T) 的 0.24 倍左右, 因此电子回旋系统投入使用时, 与其匹配的环向场电流也应约为额定电流的 0.24 倍。

环向场线圈电源的工作示意图见图 1。图 1(a) 是原有方案的电流波形示意图, t_0 之前是脉冲电流等待与爬升阶段, t_0 时刻环向场线圈电流达到脉冲平顶, t_0 之后脉冲电流平顶保持稳定以建立稳定的环向磁场, 并依次投入极向线圈电源; 图 1(b) 是改进方案的电流波形示意图, 在原方案的环向场线圈平顶电流产生之前增加一个低电流台阶以匹配电子回旋波频率, t_{n0} 之前是低电流台阶的等待与爬升阶段, $t_{n0} \sim t_{n1}$ 是低电流台阶平顶, $t_{n1} \sim t_0$ 是高电流台阶的爬升阶段, 改进方案中的 t_0 与 (a) 图中的 t_0 都是高电流平台的建立时刻, 与原始方案一样 t_0 之后极向线圈电源依次投入。

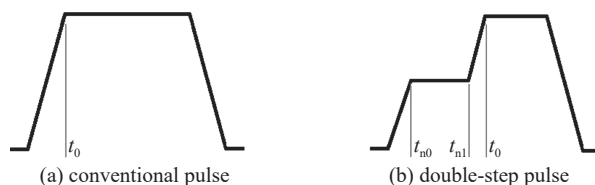


Fig. 1 Current diagram of Toroidal coil power supply

图 1 环向场线圈电源电流波形示意图

2 原始方案

球形托卡马克装置的磁场线圈电源所需能量小, 但瞬时功率大, 电容储能的方案更有优势^[10-11]。NCST 装置原有的环向场线圈供电方案见图 2: C_1 是低压大容量电容, 作为主要储能器件提供电流平顶; C_2 是高压小容量电容, 用于增加电流脉冲上升速度。实际应用中, 图 2 所示的电路最大可产生 22.5 kA 的脉冲电流^[6, 12]。

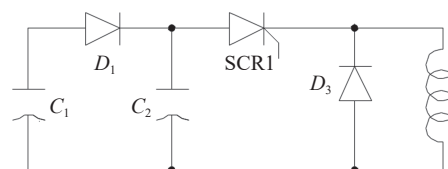


Fig. 2 Conventional scheme^[6, 12]

图 2 原方案^[6, 12]

为了使图 2 所示的原有电源在改造后能产生大功率双阶梯脉冲电流, 现提出两种改造方案, 半控型方案和全控型方案, 分别见图 3(a)、(b)。

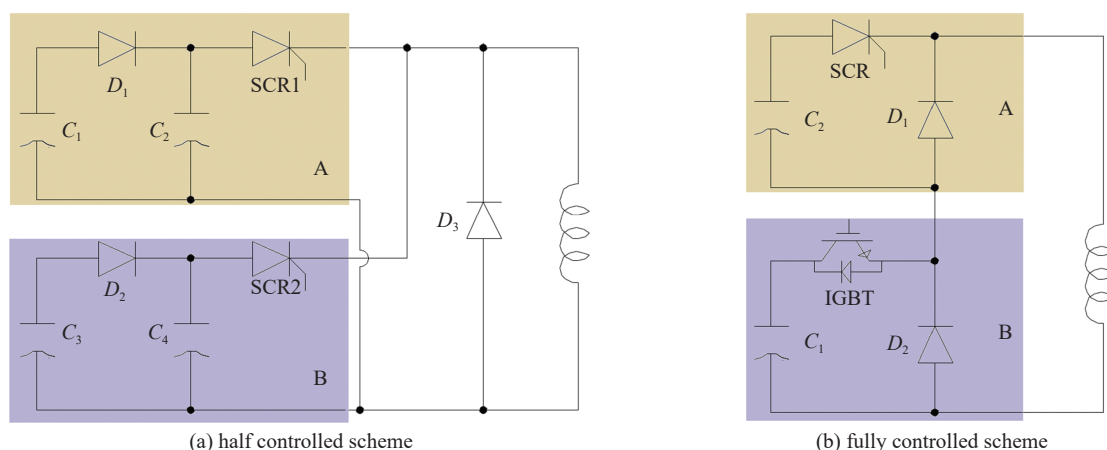


Fig. 3 Modified schemes

图 3 改造方案

3 半控型方案

半控型方案见图 3(a), 原方案的电路组合保持不变, 仍然用于提供等离子体正常运行期间所需的环向场磁场, 电路原理图见阴影区域 A, 新增一组电路提供第一个电流平顶, 用于与电子回旋波频率匹配, 电路原理图见阴影区域 B。B 组电路与 A 组电路并联, 二极管 D3 作为电感负载的续流通路。

改造细节是, 图 2 的原有结构保持不变, 新结构直接并联到原有设备上, 控制方式基本不变。图 4(a) 是仿真电流波形, 0.2 s 之前是第一个电流平台, 0.2 s 之后是第二个电流平台。图 4(b) 是仿真电压波形, 0.05 s 之前是 B 组高

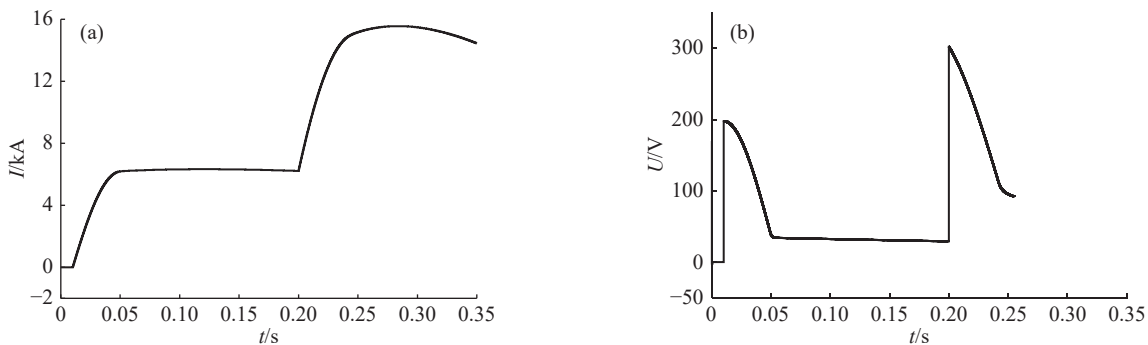


Fig. 4 Waveforms of toroidal coil in half controlled scheme

图 4 半控型方案的环向场线圈波形

压电容提供高电压, 让电流快速上升, 0.05~0.2 s 时, B 组的低压电容提供平顶能量, 0.2~0.25 s 时, A 组的高压电容提供高电压, 0.25 s 之后 A 组的低压电容提供平顶能量。

半控型方案的本质是电容、电感和电阻的二阶电路^[13], 4 个电容的组合工作具有相同的电路运行原理, 仅器件参数和初始值不一样, 电流公式^[14-15]为

$$I = -C(A_1 P_1 e^{P_1 t} + A_2 P_2 e^{P_2 t}) \quad (2)$$

电流达到峰值的时刻^[14-15]

$$t_m = \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{P_1 - P_2} \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{P_2 U_0}{P_2 - P_1} \quad (4)$$

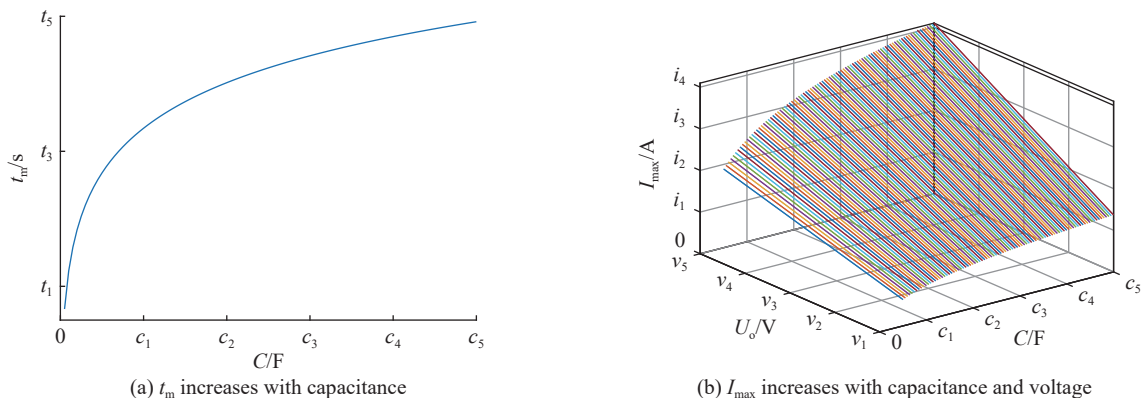
$$A_2 = -\frac{P_1 U_0}{P_2 - P_1} \quad (5)$$

$$P_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (6)$$

$$P_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (7)$$

式中: R 是回路等效电阻, 为磁场线圈的等效电阻和线路等效电阻之和, L 是磁场线圈电感, C 是储能电容容量; I 是电感电流, U_0 是电容电压初始值。

电流上升时间 t_m 与电容容量 C 的关系见图 5(a), 电流最大值 I_{max} 与电容容量 C 、初始电压 U_0 的关系见图 5(b), 由图可知, 提高初始电压和电容容量都能使电流峰值 I_{max} 增加, 因此可根据脉冲电流上升时间和电源额定电流确定高



(a) t_m increases with capacitance

(b) I_{max} increases with capacitance and voltage

Fig. 5 t_m and I_{max} influenced by capacitance and initial voltage

图 5 电容量和初始电压对电流上升时间和电流峰值的影响

压电容的容量和额定电压。

低压电容应在高压电容提供的脉冲电流达到最大值瞬间投入电路,根据电路结构低压电容的初始电压约等于高压电容此时的剩余电压,又根据所需电流平顶宽度来确定低压电容容量。

4 全控型方案

全控型方案见图3(b),将原方案的低压电容用作两级平顶能量的主要储能器件,新增全控型器件绝缘栅双极晶体管 IGBT,用高频斩波的方法控制输出电流,电路原理图见阴影区域 B,高压电容用于提高第二个电流平顶爬升速度,电路原理图见阴影区域 A。B 组电路与 A 组电路串联,二极管 D_1 和 D_2 串联作为电感负载的续流通路。

改造细节是,图2的原有结构被拆解,器件被分开用到新结构里,新增器件 IGBT,主要开关器件由半控型改为全控型,全控型方案是闭环控制。图6(a)是仿真电流波形,0.05 s 之前是 B 组低压电容爬升,0.05~0.2 s 是第一个电流平台,0.25~0.35 s 是第二个电流平台,A 组电容与 B 组电容串联提供第二个电流平台的上升能量,(b)是仿真电压波形,0.2 s 之前负载电压等于 B 组电容的电压,0.2 s 时刻 A 组高压电容投入使用,因此负载电压骤升。

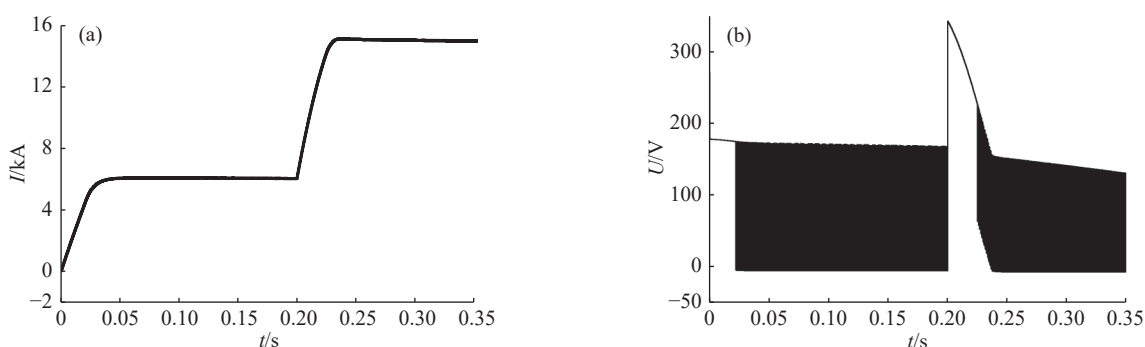


Fig. 6 Waveforms of toroidal coil in fully controlled scheme

图6 全控型方案的环向场线圈波形

负载电流电压纹波见图7,平顶阶段,IGBT 导通时,回路为电容、电感和电阻的二阶电路,负载电流逐渐上升,负载电压约等于电容电压,IGBT 关断后低压电容切出电路,负载电流通过二极管续流,逐渐下降,负载电压约等于零,因此负载电压是与开关频率和占空比有关的脉动波形,开关频率越高电流纹波越低,因此半控型方案电流波形更光滑,全控型方案的电流波形也带有高频纹波。

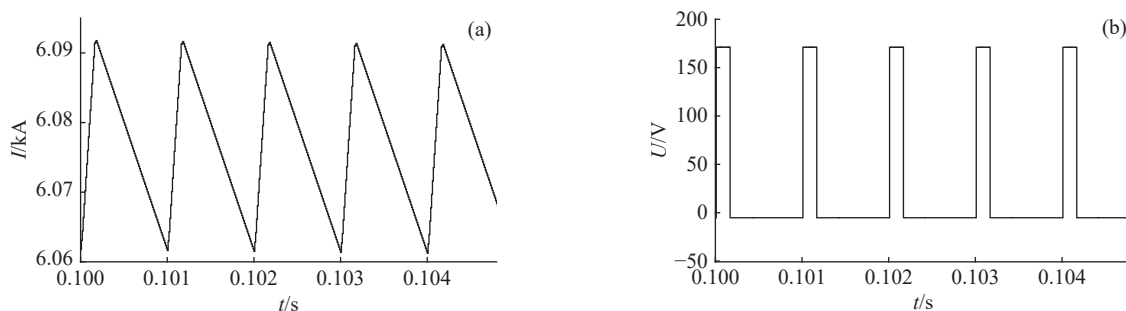


Fig. 7 Detail of voltage and current ripples

图7 负载电压和电流细节

5 方案分析与对比

分析图6(b)和图4(b)的电压谐波成分,文中全控方案开关频率为 1 kHz,结果见图8,纵坐标 P 表示谐波幅值与直流成分的百分比,横坐标 *harmonic frequency* 是谐波频率,图8(a)是半控型方案的分析,可见负载电压几乎没有高次谐波,而图8(b)中全控型方案的负载电压上有高次谐波。

图9是电流波形的平顶波动率对比图,(a)、(b)分别是半控型方案的第一个电流平台和第二个电流平台的电流波动率,(c)、(d)分别是全控型方案第一个电流平台和第二个电流平台的电流波动率,半控型方案第一个电流平台和第二个电流平台的波动率范围分别是-1.5%~+0.7%、-4.5%~+1.9%,全控型方案第一个电流平台和第二个电流平台的波动率范围分别是-0.65%~+0.42%、-0.5%~+0.51%,半控型方案的平顶电流波动范围比全控型方案

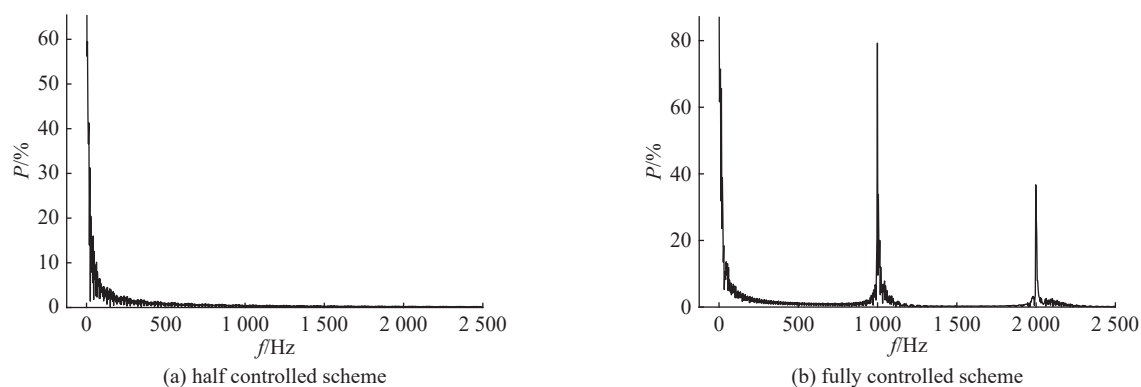


Fig. 8 FFT analysis of load voltage

图 8 负载电压谐波成分分析

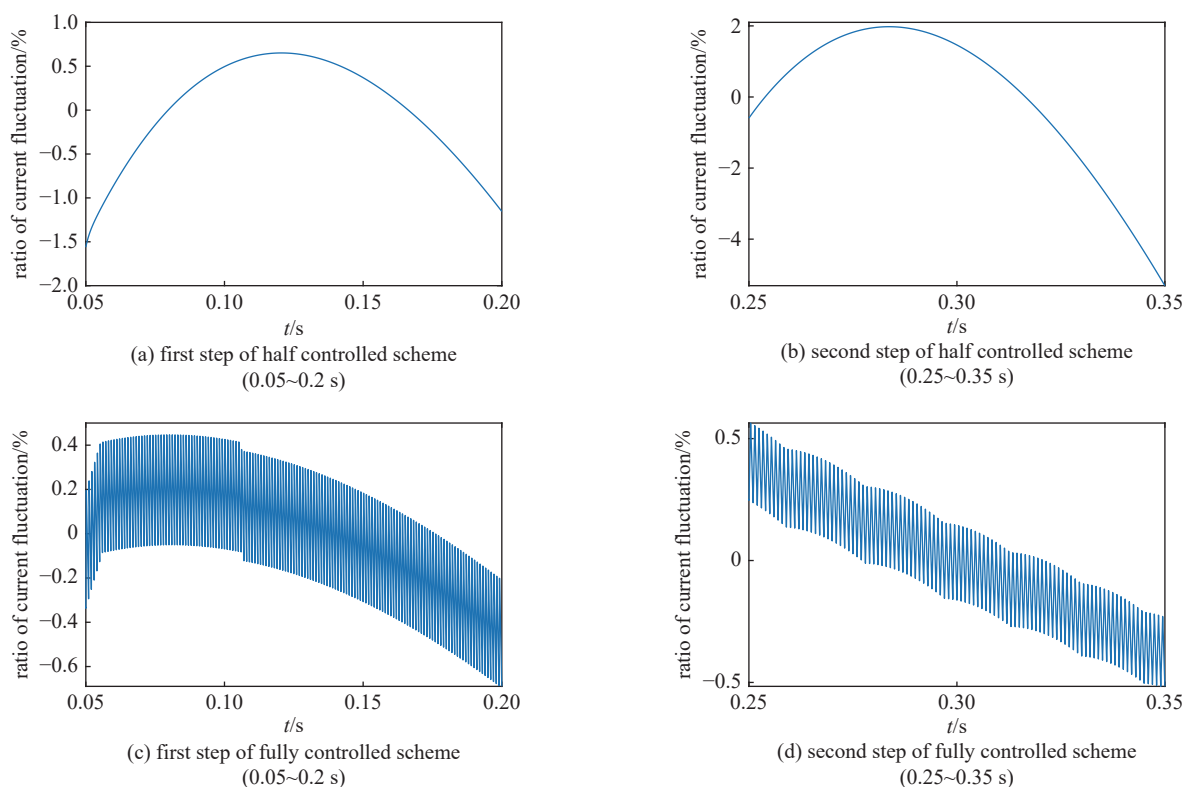


Fig. 9 Ratio of current fluctuation in different schemes

图 9 负载电流波动率

更大。

6 实际波形

在波形质量方面, 对比图 4(a) 和图 6(a), 参考图 9, 全控型电源提供的电流从整体看更平稳、更可控, 但图 9 也显示全控型电源的电流波形有高频纹波, 而半控型电源的电流波形更平滑。对比图 4(b) 和图 6(b), 半控型方案的电压波形上几乎没有高次谐波。

控制性能方面, 半控型方案的电路主要开关器件是晶闸管, 可控性低, 电流平台波动依赖二阶电路的自动放电, 全控型方案的主要开关器件是全控型器件 IGBT, 电流的幅度和纹波都可通过软件调节, 全控型方案的电流纹波可以通过增加开关频率和改善闭环控制算法来改善。

硬件改造方面, 半控型方案中原装置可保留不变, 另新增一组低电流平台产生电路, 将新结构直接并联到原有设备上, 原电源的主要结构无改变, 控制方式基本不变, 增加低电流台阶也保持了原有放电能力。全控型方案需将原有结构拆解, 器件重新利用, 新增器件 IGBT, 主要开关器件由半控型改为全控型, 全控型方案需用闭环控制, 相当于重新制作一套电源。

根据现场安装条件,为了减少硬件结构的改动,不改变软件控制与运行方式,减少硬件成本,再综合上述方案优缺点,NCST球形托卡马克装置的环向场线圈电源改造选用半控型方案。

改造前电流波形见图10,图10为电源的实际输出波形,对应NCST装置实验炮号是220611012,电流是平顶时间150 ms左右的单脉冲。改造后的环向场实际电流波形见图11,(a)是第23072934炮实验的电流波形,第一个电流台阶为6 kA,时间是100 ms左右,第二个电流台阶为15 kA,时间为100 ms左右,(b)是第23072933炮实验的电流波形,第一个电流台阶为6 kA,时间是140 ms左右,第二个电流台阶是15 kA,时间为100 ms左右。

对比图11与图10,改造后的波形引入了6 kA的低电流台阶,且低电流台阶的平顶时间可调节。

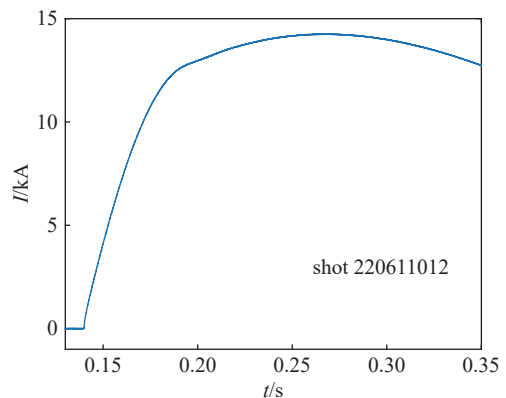


Fig. 10 Actual current waveform before modification

图10 改造前电流波形

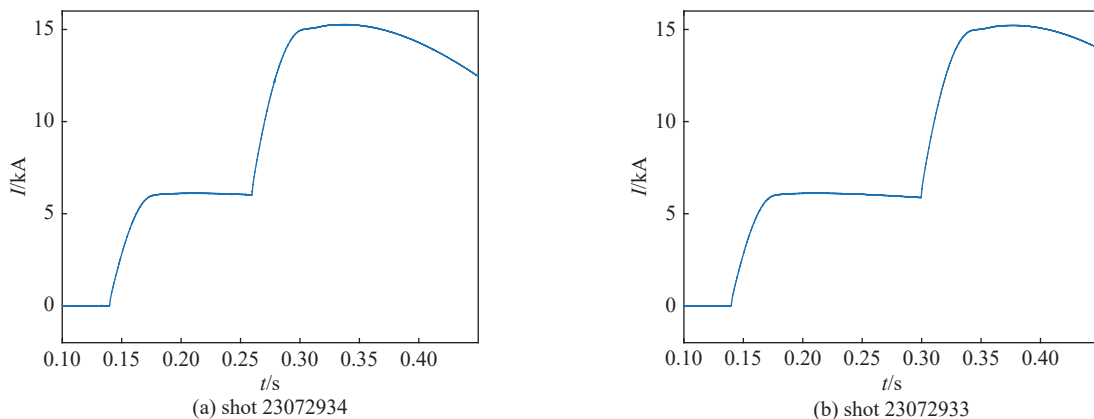


Fig. 11 Actual current waveforms after modification

图11 改造后电流波形

7 结论

论文提出了两种电源改造方案,从电压电流的高次谐波、对原有电源的改动幅度、安装便捷性、成本、性能全方位做对比。虽然全控型方案比半控型方案的电流更平稳,可控性更强,但是全控型方案的电压电流高次谐波更多,引入全控器件IGBT后方案改动比半控型大,且成本更高,最终选择半控型方案。电源改造结束后,两个电流台阶衔接正常,第一个电流台阶宽度可调、幅值可调。

致谢 感谢核工业西南物理研究院聚变科学所托卡马克供电技术研究室的同事,南昌大学物理与材料学院的陈小昌老师、肖东华同学、熊玉珍同学给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 中国国际核聚变能源计划执行中心,核工业西南物理研究院. 国际核聚变能源研究现状与前景[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2015: 1-10. (China International Nuclear Fusion Energy Program Execution Center, Southwestern Institute of Physics. Current situation and prospect of international nuclear fusion energy research[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2015: 1-10)
- [2] 熊健, 刘海, 宣伟民, 等. CFQS装置准环对称测试用磁体电源系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35: 025001. (Xiong Jian, Liu Hai, Xuan Weimin, et al. Design of magnet power supply system for quasi-axisymmetric test of Chinese first quasi-axisymmetric stellarator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35: 025001)
- [3] Chen Bin, Zhu Yubao, Zhou Qing, et al. Microwave preionization and electron cyclotron resonance plasma current startup in the EXL-50 spherical tokamak[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24: 015104.
- [4] Xie Jiaying, Wei Xuechao, Liu Haiqing, et al. Development of a combined interferometer using millimeter wave solid state source and a far infrared laser on ENN's XuanLong-50 (EXL-50)[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24: 064004.
- [5] Wang Ying, Zeng Li, He Yexi, et al. Initial plasma startup test on SUNIST spherical tokamak[J]. Plasma Science and Technology, 2003, 5(6): 2017-2022.

- [6] Hou Ming, Qian Yuzhong, Liu S Q, et al. Design of power supply system for the NanChang Spherical Tokamak[J]. *AIP Advances*, 2022, 12: 025106.
- [7] Chen F F. 等离子体物理学导论[M]. 林光海, 译. 北京: 科学出版社, 2016. (Chen F F. Introduction to plasma physics[M]. Lin Guanghai, trans. Beijing: Science Press, 2016)
- [8] 袁保山, 姜韶风, 陆志鸿. 托卡马克装置工程基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2011: 470. (Yuan Baoshan, Jiang Shaofeng, Lu Zhihong. Fundamentals of Tokamak installation engineering[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2011: 470)
- [9] Wesson J. Tokamaks. The international series of monographs on physics[M]. New York: Oxford University Press, 2011.
- [10] 邓珀昆, 林楷宣, 罗秋燕. 等. 基于晶闸管的大电流脉冲发生器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 115003. (Deng Pokun, Lin Kaixuan, Luo Qiuyan, et al. Development of large current pulse generator based on thyristor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 115003)
- [11] 陈志强, 谢霖桑, 贾伟, 等. 电磁脉冲模拟装置用 3MV 中储电容器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 095001. (Chen Zhiqiang, Xie Linshen, Jia Wei, et al. Development of a 3 MV transfer capacitor used in an electromagnetic pulse simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 095001)
- [12] He Yexi, Li Xiaoyan, Gao Zhe. Coupling effect between equilibrium field and heating field and modification of the power supply system on SUNIST spherical tokamak[J]. *Plasma Science and Technology*, 2005, 7(1): 2623-2625.
- [13] 李松杰, 赵娟, 康传会, 等. 240 kJ 模块化能库型脉冲放电电源研制[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 095015. (Li Songjie, Zhao Juan, Kang Chuanhui, et al. Development of a 240 kJ modularized pulsed power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 095015)
- [14] 邱关源. 电路[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006. (Qiu Guanyuan. Circuits[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006)
- [15] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1985. (Zhao Kaihua, Chen Ximou. Electromagnetics[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1985)