



核科学与工程

## EAST 鱼尾偏滤器磁体线圈电源的研制\*

周 宇<sup>1</sup>, 王禹晨<sup>1,2</sup>, 黄懿赞<sup>1,2</sup>, 郭 斐<sup>1</sup>, 孙浩章<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 科学岛分院, 合肥 230031)

**摘 要:** 为了满足复杂多变的电磁环境对正弦电流精度和变频调幅稳定输出的要求, 提出了 LC 串联谐振理论与高频 PWM 调制技术相结合的设计思想。研制了一种多频点 (10~3800 Hz)、电流高达 8000 A 的正弦波电源。FTD 电源采用直流开关电源技术、SPWM 调制技术和 LC 串联谐振理论。输出电流工作点包括 10 Hz@8000 A、20 Hz@6000 A、30~110 Hz@5000 A 和 1.3~3.8 kHz@2400 A。采用电流反馈和频率反馈控制策略, 输出电流精度可达 5%。测试结果表明, FTD 电源能够满足系统要求, 实现了对偏滤器偏转磁场的强度和频率的调节, 为偏滤器靶板的粒子热沉积效果的对比实验提供了支持。

**关键词:** 磁体线圈电源; 鱼尾偏滤器; 串联谐振; EAST; 正弦波电源

中图分类号: TM919

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220329

## Development of power supply for EAST fishtail divertor

Zhou Yu<sup>1</sup>, Wang Yuchen<sup>1,2</sup>, Huang Yiyun<sup>1,2</sup>, Guo Fei<sup>1</sup>, Sun Haozhang<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Fishtail Divertor (FTD), a new divertor concept, is a significant research object of EAST tokamak divertor system. To meet the requirements of sinusoidal current precision and variable frequency, the combination of Inductance and Capacitance (LC) series resonance theory and high-frequency Pulse Width Modulation (PWM) technology is put forward. A sine wave power supply with multi frequency points (10-3800 Hz) and current up to 8000 A is developed. The FTD power supply adopts DC switching power technology, Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) technology and LC series resonance theory. The operating points of output current include 10 Hz at 8000 A, 20 Hz at 6000 A, 30 to 110 Hz at 5000 A and 1300 Hz to 3800 Hz at 2400 A. The output current accuracy can reach 5% by the current feedback and frequency feedback control strategy. The test results demonstrate that the FTD power supply can meet the system requirements, and it can provide reference for the design of other divertor power supply.

**Key words:** magnet coil power supply, fishtail divertor, series resonance, EAST, sine wave power supply

偏滤器是环形聚变装置(如托卡马克)的组成部分<sup>[1]</sup>。该装置用于将带电粒子从排出的外壳层转移到单独的腔室,以便带电粒子轰击挡板并成为中性粒子,然后被抽走。这种方法可以避免高能粒子轰击主放电室壁,从而避免释放能够冷却放电的二次粒子<sup>[2]</sup>。

1995 年, A. R. Field 等人在 ASDEX-U 装置上对偏滤器板材料的溅射进行了研究,从偏滤器靶板材料的角度论证了钨作为石墨的替代的可能<sup>[3]</sup>。而 G. Ambrosino 等人则在 JET 装置上对偏滤器极限扫描模型进行了研究,以将偏滤器的热负荷分布在更大的区域<sup>[4]</sup>。与分流器静态磁结构相比,鱼尾偏滤器(FTD)在偏滤器靶板背面与靠近撞击点处配备了交变磁场<sup>[5]</sup>,其交变极性磁场使打击点像鱼尾一样摆动,动态扩大偏滤器板上的热流沉积区域,降低板的热流密度,降低板表面温度<sup>[6]</sup>。因此,鱼尾偏滤器的研究对实验先进超导托卡马克(EAST)进行长脉冲放电实验是有帮助的<sup>[7]</sup>,并为未来的反应堆提供一种可能的磁势型偏滤器,在科学、工程、技术、材料和方法方面做准备<sup>[8-9]</sup>。

\* 收稿日期:2022-10-08; 修订日期:2023-02-21  
基金项目:国家自然科学基金项目(11735016)  
联系方式:周 宇, zhouyu@ipp.ac.cn。  
通信作者:黄懿赞, yyhuang@ipp.ac.cn。

为研究等离子体热流、偏滤器靶板热沉积和FTD线圈电流之间的机制,有必要开发一种正弦电流和频率可调的电源。本文介绍了偏滤器磁体线圈电源的需求设计,分析了线圈电源的硬件原理和控制方法,并用实验结果验证了电源的设计要求。

## 1 电源的原理

偏滤器偏转磁场的频率和幅度是由其磁体线圈电源提供的电流所控制,如表1所示,电源的输出电流频率从低到高分为3个频段。按照常规正弦波脉冲宽度调制(PWM)高频调制的设计思路,则电源在高频电流工作点需要提供1.5 MW的输出功率,这些功率负载电阻上只分担150 kW有功功率<sup>[10]</sup>。故而本电源基于LCR串联谐振的原理,以少量有功功率激励LC电路以产生大量谐振无功的方式实现高频电流输出<sup>[11]</sup>,根据不同频段的要求,采用不同的方式产生正弦波电流。该电源的工作原理是:直流功率模块将400 V的交流电压转换为0~500 V可调的直流母线电压。直流母线电压通过调频H桥输出由方波逆变产生的30 Hz~3.8 kHz方波电压以及由正弦波调制产生的10 Hz和20 Hz正弦脉冲宽度调制(SPWM)波。经过负载电感滤波后,SPWM波电压将输出正弦电流,而双极性方波电压激励LC谐振网络获得正弦响应电流。

表1 FTD电源的主要技术参数.

Table 1 Main requirements of FTD power supply

| rated voltage/V | current mode | current frequency/Hz | current amplitude/A | current accuracy |
|-----------------|--------------|----------------------|---------------------|------------------|
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 10                   | 8000                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 20                   | 6000                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 30~110               | 5000                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 1300                 | 2400                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 1800                 | 1800                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 2500                 | 1500                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 3200                 | 1400                | ≤5%              |
| ±3500 AC        | sinusoidal   | 3800                 | 1200                | ≤5%              |

如图1所示,FTD电源电路结构由直流功率模块、调频逆变器和多频谐振网络3部分组成。直流功率模块作为系统的直流功率源,由6个高频开关电源单元并联组成。单元容量为40 kW/500 V,总模块功率为240 kW。谐振电流幅值可通过直流电压调节。H桥逆变器有两个作用:一是将直流母线电压调制成10、20 Hz的SPWM波;另一个是将直流电压转换为30 Hz至3.8 kHz范围内13个频率的双极方波电压。LC串联谐振网络由降压变压器、谐振电容和负载电感组成。

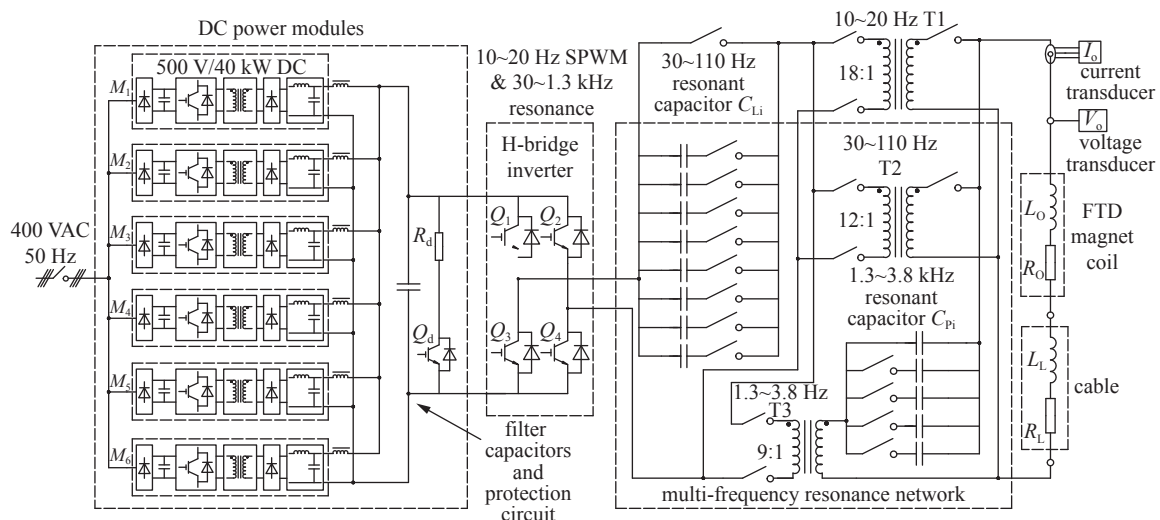


Fig. 1 Circuit diagram of FTD magnet coil power supply (PS)

图1 FTD磁体线圈电源的电路原理

## 2 电源的硬件设计

整个电源的设计分为直流模块、H 桥逆变器、10~20 Hz 的 SPWM 支路、低频谐振电路和高频谐振电路, 见图 2。

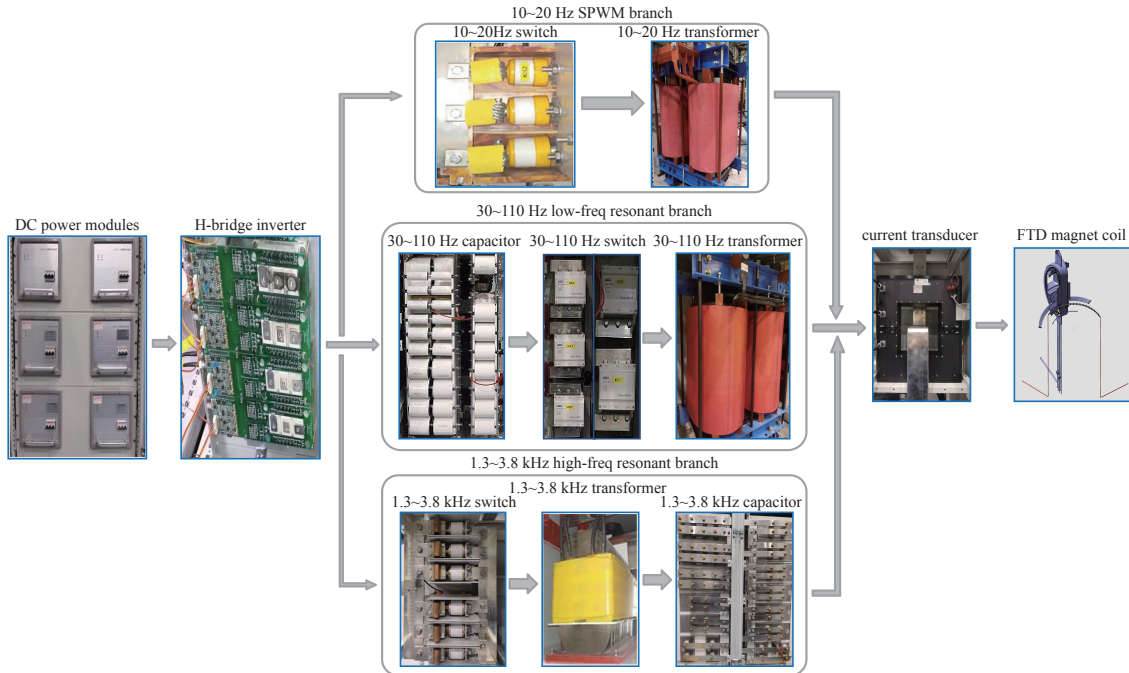


Fig. 2 Hardware schematic diagram of the FTD magnet coil PS

图 2 FTD 磁体线圈电源的硬件原理图

### 2.1 直流开关功率模块设计

电源通过由 6 个并联使用的直流电源单元组成的直流电源模块将交流输入转换为直流母线电压。图 3 为单元的内部电路结构。单个直流模块单元采用高频开关电源方案, 通过零电压开关(ZVS)DC-DC 变换器可以输出幅值高达 500 V 的直流母线电压。功率单元内的电压控制芯片通过变换器中高频全桥的移相控制, 实现输出电压的可调。转换器的开关频率可以达到 12 kHz, 因此电压纹波系数可以小于 50 ppm。

6 台直流单元分别串联 1 mH 平波电抗器后采用并联的方式构成电源直流功率模块。在直流模块输出端并联了电容器组以增加母线储能, 提高谐振时直流母线电压的稳定性, 如图 4 所示, IGBT(Sd)和电阻(Rd1、Rd2)为直流模块泄放保护支路。

### 2.2 H 桥逆变器的设计

如图 5 所示, 调频 H 桥逆变器是 FTD 电源中最关键的执行环节。H 桥能够以 12 kHz 频率进行 SPWM 调制, 输出 SPWM 调制方波电压, 经过变压器降压后进而在负载等效电感的滤波作用下产生正弦波电流。除此以外, H 桥逆变器还可以将直流母线电压逆变为 30 Hz~3.8 kHz 的双极性方波电压, 作为谐振电路的激励电压, 从而响应出同等频率的谐振正弦波电流。

电源选用英飞凌公司的 FF450R12KE4 绝缘栅双极晶体管(IGBT)半桥模块构建调频 H 桥逆变器, 器件额定参数为 1200 V/450 A, 开关工作频率最高可达 20 kHz。H 桥的电路拓扑图和等效原理图如图 5 所示, 其连接方式等效为两只半桥中同位 IGBT 并联使用, 增加 H 桥额定电流至 900 A。

### 2.3 低频谐振电路的设计

FTD 电源的低频谐振电路是由谐振电容器组、支路开关、低频变压器以及负载电感构成的。凭借开关和电容器的组合支路, 该电路可以产生 30、40、50、60、70、90、100、110 Hz 八个谐振工作点。由于作为谐振电感的负载线圈电感不超过 30  $\mu\text{H}$ , 根据谐振点频率计算谐振电容最大将达到 1.33 F。因而, 将该电容器组及其支路开关置于降压变压器的原边, 借助变压器的耦合特性以降低电容器的容值和额定电流。低频变压器设计为 300 kVA 容

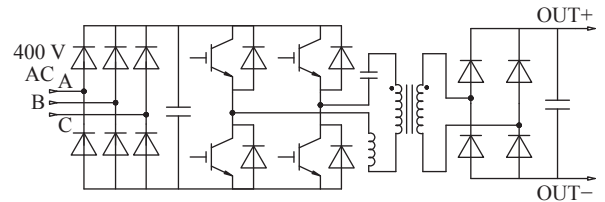


Fig. 3 Prototype of DC power unit in FTD magnet coil PS

图 3 直流功率模块单元的电路拓扑

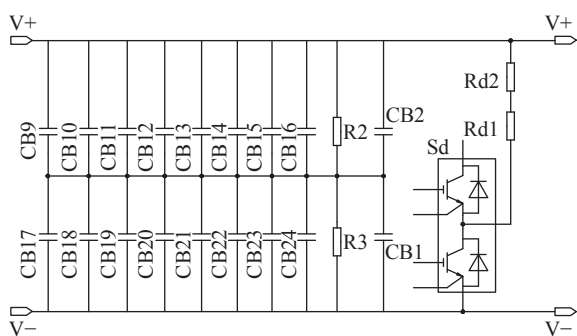


Fig. 4 Circuit diagram of DC bus capacitor bank

图 4 直流母线电容器组的拓扑

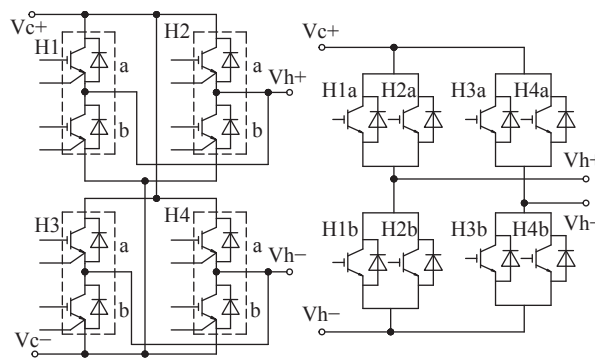


Fig. 5 Circuit topology and equivalent schematic of the H-bridge inverter in FTD magnet coil PS

图 5 H 桥逆变器的电路拓扑及其等效原理图

量、变比 12:1 的工频变压器,支路开关选型为 160 A/1.5 kV 的真空接触器,电容器为薄膜电容器。

### 2.4 高频谐振电路的设计

高频谐振电路的谐振频率工作在 1.3、1.8、2.5、3.2 kHz 和 3.8 kHz。经计算其谐振电容容值最小为 0.14 mF,最大为 1.12 mF,因此将其置于降压变压器的副边侧。此时降压变压器为高频变压器,变比为 9:1,谐振电容为油浸电容器。

### 3 控制策略

FTD 电源有三种频率工作方式:SPWM 调制方式、低频谐振方式和高频谐振方式。电源的控制流程图如图 6 所示。首先,设置正弦电流的振幅和频率,得到测量电流与设定电流的偏差  $I_{err}$ 。然后根据给定频率选择控制模式。在低频调制模式下,系统通过 DSP 控制器的 SPWM 脉冲信号驱动 H 桥产生脉冲电压,并滤除负载电感所需的正弦电流。在低频谐振模式下,根据给定的频率,通过控制接触器选择相应的谐振支路。系统控制器 DSP 控制 H 桥产生相应的频率方波激励电压。通过控制直流母线电压,实现正弦电流幅值的反馈调节。除了频率反馈外,高频谐振模式的控制过程与低频谐振模式的部分相似。由于高频的负载特性会受到复杂电磁环境的干扰,从而导致谐振频率产生偏差,因此与低频模式相比,高频谐振模式增加了频率反馈过程,以确保谐振电流不会衰减<sup>[12]</sup>。

### 4 实验结果

在理论建模分析、仿真验证的基础上完成了电源系统的研制。图 7 为线圈电源在 10 Hz 工作频率下以 SPWM 模式下的输出电流测试结果。如黄线所示输出电流幅值为 5100 A,电流幅值偏差为 2%,满足精度要求。蓝色线和红色线分别是变压器的一次电压和二次电压,符合 SPWM 的输出特性。

图 8 为线圈电源的输出正弦波电流在 110 Hz 低频谐振工作点的实验结果。从图 8 可以看出:输出电流幅值为 5100 A,偏差为 2%,满足精度要求;H 桥逆变器输出的方波电压,幅值为 280.5 V;该频率下的谐振输出电压,振幅为 99.5 V;当方波激励电压阶跃时,可以清楚地发现谐振过程中的电压阶跃。这种现象是因为此时,感应电流的电流变化率发生了由正到负的变化。而感应电压等于电感和电流变化率的乘积,所以感应电压的极性发生了翻转。

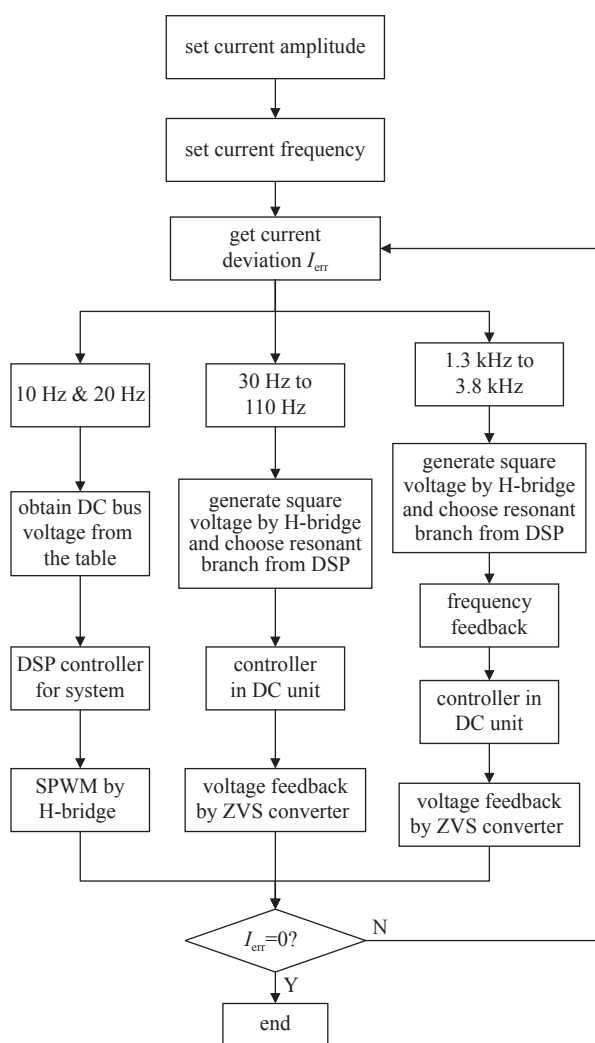


Fig. 6 Flow chart of control process for amplitude and frequency of coil current

图 6 电源的电流幅值及频率控制过程流程图

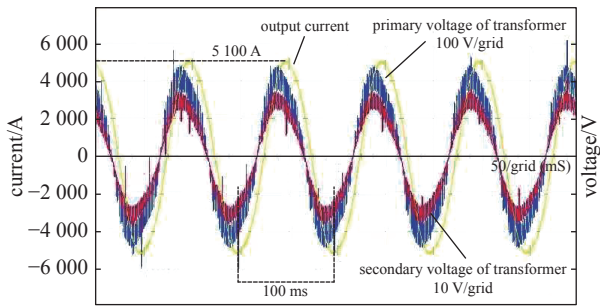


Fig. 7 Output current, primary and secondary voltage of transformer when the power supply is in 10 Hz modulation mode

图7 在10 Hz调制模式时电源输出电流、变压器的一次和二次电压

图9为线圈电源在1.3 kHz高频谐振工作点的输出正弦波电流的实验结果。由图可见:输出电流幅值为2320 A,电流偏差为3.3%,满足精度要求;H桥逆变器的输出电压为500 V,在此频率下的谐振输出电压为320 V。此外,通过图9可以清楚地发现,谐振过程中的电压幅值阶跃比110 Hz时的阶跃更陡峭。

## 5 结论

基于SPWM逆变电源技术和LC串联谐振原理,本文研制了一种输出电流可达8000 A、最高频率可达3.8 kHz的交流电源。该电源在显著降低额定容量和器件功率等级的前提下,保证了电源包含无功在内约1.5 MVA的输出功率。实验结果表明,所设计的磁铁电源能够很好地满足鱼尾偏滤器系统的要求。此外,还可为偏滤器的进一步研究和磁铁电源的研制提供参考。

## 参考文献:

- [1] Chankin A V. JET装置上偏滤器功率的红外测量[J]. 李锐,译. 国外核聚变与等离子体应用, 1995(4): 33-39. (Chankin A V. Infrared measurement of divertor power on JET device[J]. Li Rui, trans. Nuclear Fusion and Plasma Applications Abroad, 1995(4): 33-39)
- [2] 姚达毛. EAST超导托卡马克偏滤器工程研究[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 2005: 31-46. (Yao Damao. Engineering study on divertor of EAST superconducting tokamak[D]. Hefei: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 31-46)
- [3] Field A R, Fussmann G, Garcia-Rosales C, et al. Studies of divertor target plate erosion in the ASDEX-Upgrade tokamak[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1995, 220-222: 553-557.
- [4] Ambrosino G, Ariola M, Tommasi G D, et al. Plasma strike-point sweeping on JET Tokamak with the eXtreme shape controller[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(3): 834-840.
- [5] Zhang Bin, Firdaouss M, Gong Xianzu, et al. Study of power load pattern on EAST divertor using PFCFlux code[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 107: 58-63.
- [6] Khripunov B I, Koidan V S, Ryazanov A I, et al. Impact of deuterium plasma flux on fusion reactor materials: radiation damage, surface modification, erosion[J]. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, 84(7): 1252-1258.
- [7] Zhang Xiaodong, Huang Yiyun, Yao Damao, et al. Design of fishtail divertor for heat load control during long-pulse operation on EAST tokamak[C]//APS Division of Plasma Physics Meeting. 2017.
- [8] 谢韩, 宋云涛, 姚达毛. EAST超导托卡马克偏滤器水冷结构设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2009, 29(4): 331-334. (Xie Han, Song Yuntao, Yao Damao. Design of divertor cooling structure for EAST superconducting tokamak[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2009, 29(4): 331-334)
- [9] 史博, 张斌, 张辉, 等. EAST装置H模放电中上偏滤器温度分布研究[J]. *核科学与技术*, 2020, 8(2): 61-68. (Shi Bo, Zhang Bin, Zhang Hui, et al. Study on temperature distribution of the upper divertor in H-Mode discharges of EAST[J]. *Nuclear Science and Technology*, 2020, 8(2): 61-68)
- [10] Mccracken G M, Pedgley J M. Estimates of the maximum radiate power in a tokamak divertor[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1993, 35(2): 253-262.
- [11] Zhang Cheng, Shao Tao, Xu Jiayu, et al. A gliding discharge in open air sustained by high-voltage resonant AC power supply[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(11): 2843-2849.
- [12] Zhou Yu, Huang Yiyun, Guo Fei, et al. Research on resonant frequency feedback control strategy of EAST fishtail divertor magnet coil power supply[C]//2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). 2019.

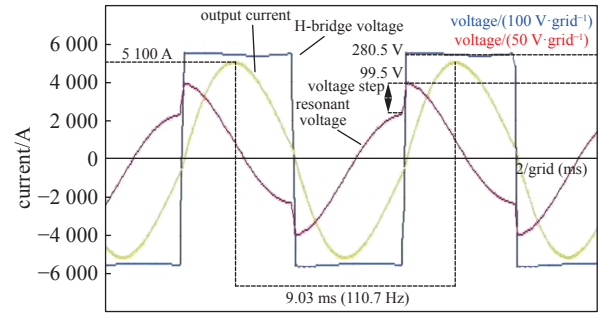


Fig. 8 Output current, H-bridge voltage and resonant voltage when the power supply is in 110 Hz resonant mode

图8 在110 Hz谐振模式时电源输出电流、H桥电压和谐振电压

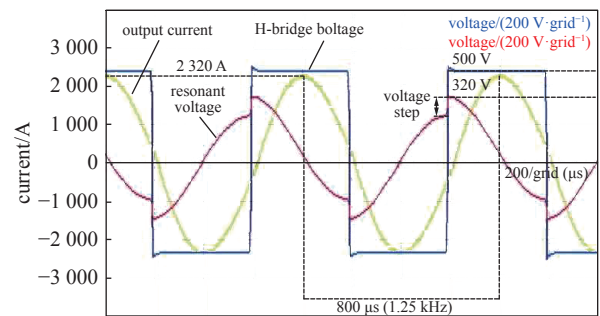


Fig. 9 Output current, H-bridge voltage and resonant voltage when the power supply is in 1.3 kHz resonant mode

图9 在1.3 kHz谐振模式时电源输出电流、H桥电压和谐振电压