



一种快校正磁铁电源设计与仿真*

王东兴, 黄毛毛, 武万锋

(深圳综合粒子设施研究院, 广东 深圳 518107)

摘要: 快校正磁铁电源是光源和加速器中重要的设备。随着光源性能的提升, 加速器对快校正磁铁电源的性能也提出了更高要求。为满足快校正磁铁电源性能要求和简化设计过程, 开展了快校正磁铁电源控制策略和仿真研究, 并提出了 PI 控制加二阶相位补偿的方法作为快校正磁铁电源的控制策略; 利用伯德图设计快校正磁铁电源的相位补偿参数, 以提高电源系统相位裕量。该方法不仅保证了电源系统工作在深度负反馈状态, 而且简化了相位补偿的参数计算过程。为了验证控制策略的正确性和有效性, 提出用压控电压源代替开关器件开展电源性能仿真的方法。仿真结果验证了上述控制策略的可行性和有效性, 同时验证了上述仿真方法的有效性和高效性。

关键词: 快校正磁铁电源; 直线加速器; PI 控制; 相位补偿; 电源仿真

中图分类号: TL503.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230239

Design and simulation of a fast corrector magnet power supply

Wang Dongxing, Huang Maomao, Wu Wanfeng

(Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China)

Abstract: The power supply for fast corrector is an important type of equipment in light sources and accelerators. With the improvement of the performance of the light source, the accelerator has put forward higher requirements for the performance of the fast corrector and their corresponding power supply. To meet the requirements of the power supply for fast corrector and simplify their design process, the research of control strategy and simulation about power supply for the fast corrector is conducted. This paper proposes a way which uses the PI control plus second-order phase compensation as the control strategy of the power supply for fast corrector. For improving the phase margin of the power supply system, Bode diagram is used to design the phase compensation parameters of the power supply fast corrector. This method not only ensures that the power supply system works in the deep negative feedback state, but also simplifies the process of parameter calculation about phase compensation. To verify the correctness and effectiveness of the control strategy, this paper proposes a simulation method based on the transfer function of switching power supply which uses voltage-controlled voltage source instead of switching devices. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the above control strategies, and verify the effectiveness and efficiency of the above simulation methods.

Key words: power supply for fast corrector, linear accelerator, PI control, phase compensation, simulation of power supply

上海硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE)、大连先进光源 (DALIS)、深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光大科学装置 (S³FEL) 和酝酿中的深圳产业光源 (SILF) 等项目的建设将助力物理、化学、生命科学、材料科学、能源科学等多种学科的过程探索和结构解析^[1-2]。高性能的光源需要更精细的加速器轨道校正^[3], 而校正磁铁通常是加速器中磁铁数量最多的设备种类之一。相应地, 校正磁铁线圈的电源性能决定了校正磁铁的磁场性能, 从而影响加速器和光源的性能。

在快校正磁铁电源方面, 国内外相关学者做了很多值得借鉴的工作: 文献 [4] 指出快校正磁铁电源通常采用线性电源和 PI 控制策略; 文献 [5] 提出了加速器电源的解析模型和最优解方法; 文献 [6] 提出一种基于 SSOGI-

* 收稿日期: 2023-07-30; 修订日期: 2023-11-04
联系方式: 王东兴, wangdongxing@mail.iasf.ac.cn。

RLSMC 新型联合算法,通过抑制电流纹波提高电流稳定度;文献[7]改进PID控制算法并通过FPGA实现电源控制;文献[8]用H桥作为输出电流的换向方式,电路结构等效于BUCK电路;文献[9]基于BBO算法实现了电源控制;文献[10]开展了稳流电源的自适应型控制研究;文献[11]提出双极性电流源的数学模型并分析了APS-U项目中校正磁铁电源的控制方案;文献[12]介绍了合肥光源小功率磁铁电源系统、控制器系统及控制算法,并进行了电源仿真和实验研究;文献[13]在TPS开展校正磁铁电源研究,建立了开关器件的温度与电源可靠性之间的关系,采用合适的控制策略不仅满足了加速器双极性电流源的稳定性指标,而且提高了电流源的可靠性;文献[14]基于欧洲X射线自由电子激光(EXFEL)装置中校正磁铁电源数量多、指标要求高的情况,从控制策略入手不仅实现了高稳定双极性电流输出,而且实现了电流源的小型化设计;文献[15]和[16]利用多电平级联拓扑结构和相位校正实现了设计目标。

超导直线加速器对快校正磁铁电源性能提出新的要求,以上诸多研究成果要么算法复杂对硬件提出较高要求,要么不适合直接使用。本文借鉴上述文献的设计思路,根据开关电源与磁铁线圈负载构成的开环系统特性,提出PI算法加二阶相位补偿的方法作为快校正磁铁电源的控制策略,利用伯德图针对磁铁电源的开环增益设计相位补偿参数,提高电源系统相位裕量。该方法不仅能保证电源系统的深度负反馈特性,而且参数配置方法简单效果明显。为完成该直线加速器的快校正磁铁电源的原理设计及验证,本文利用MATLAB的simulink模块对快校正磁铁电源的设计进行了仿真。开关器件构成的反馈控制系统严重制约仿真效率和仿真精度,其中的S函数调用、过零检测和代数环是增加计算量的主要因素^[17-19]。为提高仿真效率,本文提出了在仿真中用压控电压源方式代替场效应管(MOSFET)+脉宽调制(PWM)发生器方式进行快校正磁铁电源性能仿真。仿真结果表明,二阶相位补偿的控制策略能满足磁铁电源设计要求,而采用压控电压源(Controlled Voltage Source, CVS)的仿真方法能大幅度缩短仿真计算时间且数据可信。

1 快校正磁铁电源结构设计

1.1 设计参数

超导直线加速器的快校正磁铁线圈参数和电源性能要求见表1所示。

表1 电源设计参数
Table 1 Design parameters of power supply

current/A	magnet inductance/ μH	magnet resistance/ $\text{m}\Omega$	bandwidth/kHz	output ripple
± 15	30	30	2	10^{-4}

1.2 结构设计

电源采用图1(a)所示的电路结构。图中,AC-DC模块把220V单相交流电转换为直流电,提供直流母线电压 U_i ;4个开关驱动信号 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 对应H桥的4个MOSFET的门极驱动;电感 L_1 、 L_2 和电容 C 构成低通滤波电路抑制电源的开关纹波;DCCT(DC Current Transducer)是高精度电流传感器; L_m 和 R_m 是快校正磁铁线圈的电感和电阻。其中,MOSFET的驱动信号采用PWM信号移相模式,图1(b)是PWM信号的示意图。工程中,PWM信号频率 f 取200kHz,电感和电容分别取值为: $L_1=L_2=5\mu\text{H}$ 、 $C=30\mu\text{F}$ 。

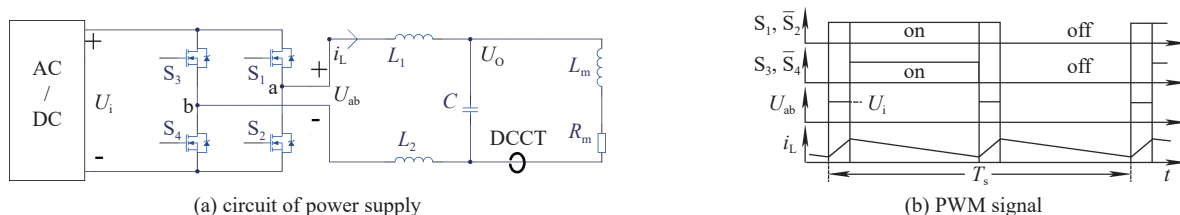


Fig. 1 Power structure and pattern of PWM

图1 电源结构及PWM模式

2 快校正磁铁电源控制算法设计

2.1 电路特性分析

开关变换器是非线性,不连续的,基于平均开关模型等一些假设,图1(a)所示的电路从PWM信号占空比到负载电流的传递函数

$$G(s) = \frac{U_i}{(L_1 + L_2)CL_m s^3 + (L_1 + L_2)R_m C s^2 + (L_m + L_1 + L_2)s + R_m} \quad (1)$$

从式(1)导出负载和滤波电路特征频率 ω_1 、 ω_2 分别为

$$\omega_1 = R_m/L_m \quad (2)$$

$$\omega_2 = 1/\sqrt{(L_1 + L_2)C} \quad (3)$$

式中: ω_1 是一阶系统的转折频率; ω_2 是二阶系统的谐振频率。从式(1)可以看出变换电路是三阶系统, 产生近 270°相移^[15-16]。式(1)表征的电路仅采用 PID(Proportional+Integral+Derivative)算法, 不能补偿足够的相位裕量。

2.2 控制算法设计及参数

为保证图 1(a)所示电路构成的反馈系统有足够的稳定裕量, 本文提出采用 PI 调节加二阶相位补偿的控制算法。其中, 采用 PI 调节提高系统增益和消除磁铁线圈负载特征频率 ω_1 的影响; 采用二阶相位补偿方法改善低通滤波电路相位特性。其相应的传递函数 $G_{PI}(s)$ 和 $G_{2o}(s)$ 为

$$G_{PI}(s) = K_p(s + \omega_1)/s \quad (4)$$

$$G_{2o}(s) = (s + \omega_3)^2/(s + \omega_4)^2 \quad (5)$$

式中: K_p 是 PI 调节器的比例项; ω_3 、 ω_4 是二阶相位补偿算法的转折频率, 并且 $\omega_3 < \omega_2 < \omega_4$ 。假定 PWM 信号的脉宽调制比 m 为 1, 则电源系统的信号图如图 2 所示。利用梅森公式可以得出电源的传递函数式为

$$G_{close}(s) = \frac{G_{PI}(s)G_{2o}(s)G(s)}{1 + H(s)G_{PI}(s)G_{2o}(s)G(s)} \quad (6)$$

考虑到 $G_{2o}(s)$ 的相位特性和 ω_2 的频率设计, 分别取 ω_3 、 ω_4 的频率为 22 kHz 和 220 kHz。为保证快校正磁铁电源电流输出带宽为 2 kHz, 其闭环增益在频率 2 kHz 频点需要满足

$$20\lg(|G_{close}(0)|) - 3 \text{ dB} \leq 20\lg[|G_{close}(2 \text{ kHz})|] \leq 20\lg(|G_{close}(0)|) \quad (7)$$

式中: $G_{close}(0)$ 为系统直流时的传递函数值。把参数代入式(2), 可获得 K_p 的取值范围: $K_p > 608$ 。

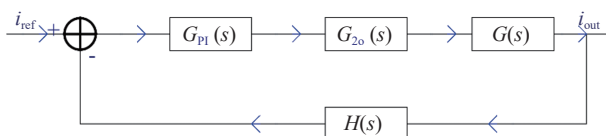
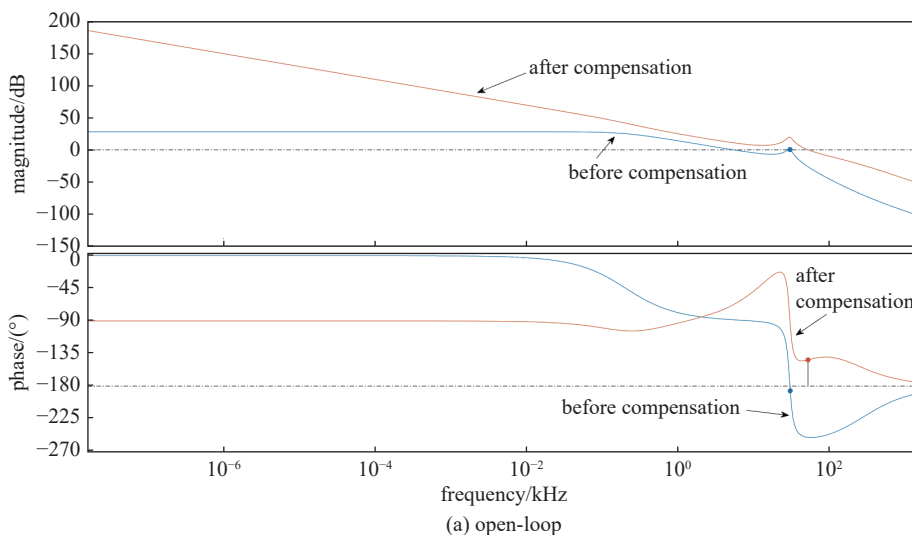


Fig. 2 Control frame of power supply converter
图 2 电源变换器的信号流图

2.3 施加控制策略后系统特征

根据式(6)做图 2 所示系统的开环伯德图, 如图 3(a)所示。图中, 调整前的曲线是变换电路 $H(s)G(s)$ 的伯德图,



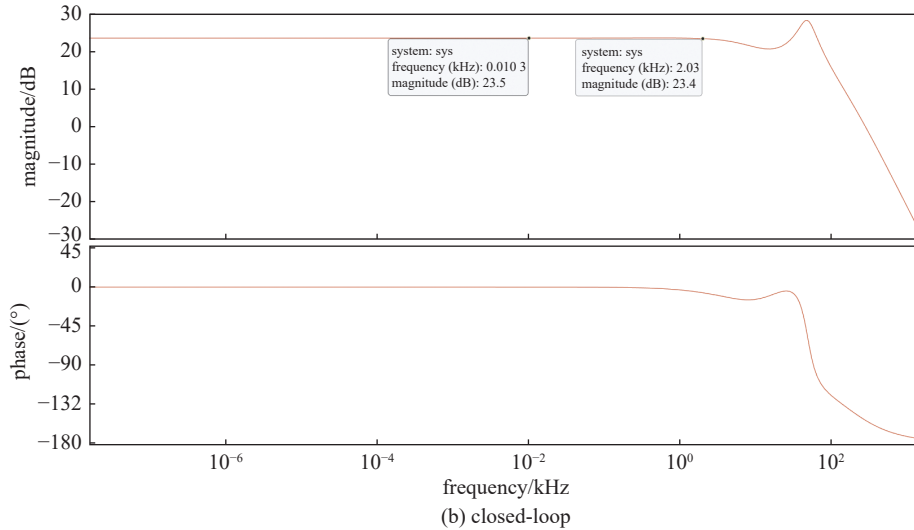


Fig. 3 Bode diagrams of system

图 3 电源传递函数的伯德图

调整后的曲线为施加控制策略后的 $H(s)G_{PI}(s)G_{20}(s)G(s)$ 的伯德图。从图中可以看出, 施加控制策略后的电源的传递函数其相位有较大的稳定裕量, 能保证电源的稳定运行。图 3(b) 为图 2 所示的电源系统闭环伯德图, 其中选 $K_p=2000$, 从图中可以看出, 电源系统闭环在 2 kHz 的增益与低频段的增益差小于 3 dB, 满足设计电源的带宽设计要求。

3 仿真验证

3.1 仿真设计

在 simulink 仿真中, 除了 MOSFET 开关脉冲边沿陡需要设定足够小的步长外, S 函数调用、过零检测和代数环是增加计算量的主要因素 [17-19]。为提高仿真效率并保证仿真结果可信, 本文提出采用压控电压源代替 MOSFET+PWM 方式进行仿真, 不仅避免在 simulink 仿真过程调用 S 函数, 而且方便采用延时方法消除电源反馈形成的代数环。

根据 PWM 信号的脉宽调制比 m 和式 (1) 中的 U_i 可以确定电源输出 L_m 、 R_m 负载两端的最高电压。因此, 用 PWM 信号脉宽调制比 m 与直流母线电压 U_i 的乘积作为压控电压源的最大输入信号。为了保证仿真过程能收敛, 分别在 L_1 、 L_2 和 C 上串联了极小的电阻, 不影响滤波电路特性。仿真电路图如图 4 所示, 其中图 4(a) 是 CVS 方式, $1/(0.000\ 01 + s)$ 是延时单元; 图 4(b) 是 MOSFET+PWM 方式。仿真模型的参数见表 2。利用命令 tic 和 toc 获得图 4

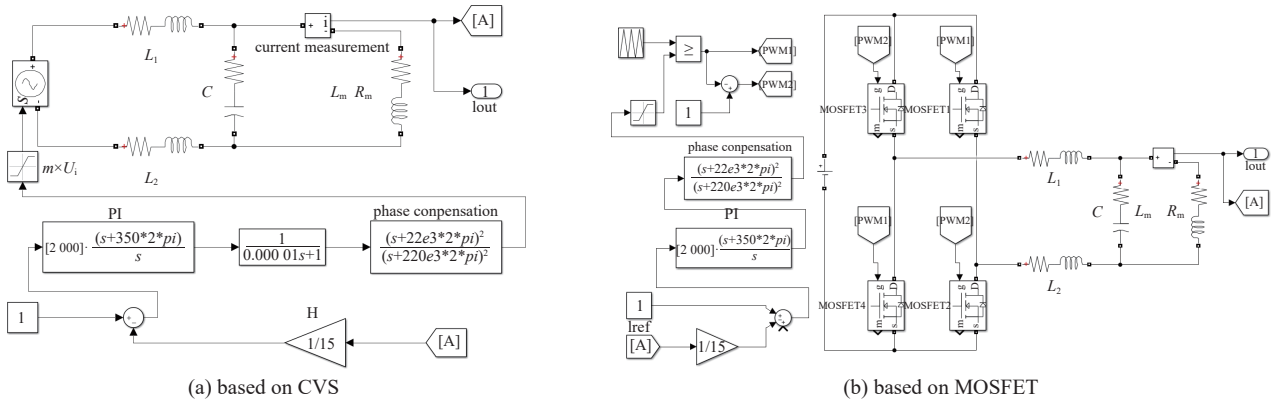


Fig. 4 Circuits of simulation

图 4 仿真电路图

表 2 仿真参数

Table 2 Parameters of simulation

U_i/V	$L_m/\mu H$	$R_m/m\Omega$	f/kHz	$L_1, L_2/\mu H$	$C/\mu F$	f_1/Hz	f_3/kHz	f_4/kHz	K_p	m
1	30	30	200	5	30	350	22	220	2000	1

所示两种方式不同仿真的用时。仿真关键参数设定: 仿真时长 0.3 s; 误差容限为 1×10^{-4} ; 自动选择求解器; 选择变步长方式。

依据上述仿真参数, 对比两种仿真模型在阶跃函数输入时系统输出特性差异; 对电源模型进行小信号带宽测试和稳定度测试; 比较两种模型的仿真统计信息。其中, 以额定输出电流值的 20% 作为不同频率正弦信号幅值的输入设定值, 通过比对输入输出信号获得电源带宽性能; 以输出电流的最大值和最小值的差与额定电流的比值作为电源的稳定度, 分别选额定输出电流值的 10%、30%、50%、70%、100% 作为观测点, 分别考察电源稳定后不同观测点中的电流输出最大值和最小值。

3.2 仿真结果

图 5(a) 是两种仿真模式同样设定的电流输出, I_{ref} 是电流设定, 图中分别给出了基于 MOSFET+PWM 和 CVS 仿真的电流输出; 图 5(b) 给出了两种仿真结果的偏差。表 3 是电源的开关纹波的仿真测试结果。图 6 是电源小信号频率响应带宽仿真测试曲线。表 4 是两种仿真模型的关键仿真事件统计, delay 表示增加了消除代数环的延时。

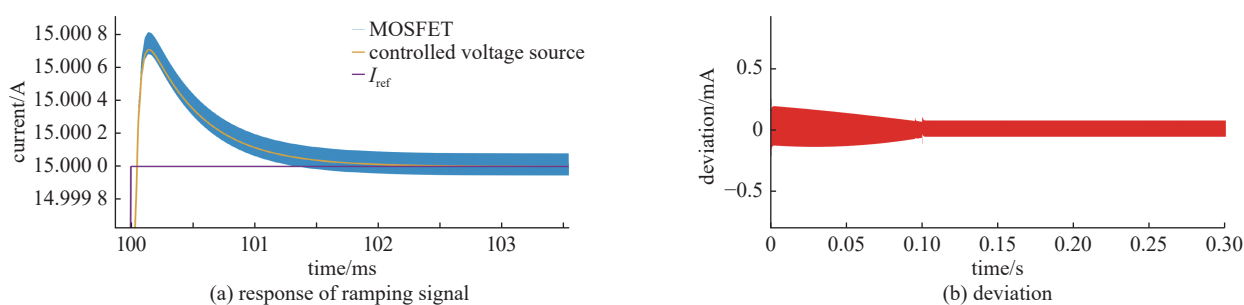


Fig. 5 Response of ramping signal and deviation based on two models of simulation

图 5 两种仿真模型斜坡信号响应及偏差

表 3 输出电流纹波测试结果

Table 3 Test results of output current ripple based on simulation

current setting/A	ripple peak/ μ A	stability/ 10^{-6}
15.0	140	9.33
10.5	230	15.33
7.5	275	18.33
4.5	320	21.33
1.5	325	21.67
-1.5	325	21.67
-4.5	310	20.67
-7.5	275	18.33
-10.5	230	15.33
-15.0	135	9.00

从图 5 可以看出, 采用 CVS 和 MOSFET 方式仿真能获得一致的电流输出曲线趋势; 除零点外, 两种仿真电流的输出偏差均小于 2.5×10^{-4} , 基于 CVS 的仿真能真实反映电路的特性。从图 6 可以看出, 输出相移和幅度衰减都满足 2 kHz 的带宽。从表 3 可以看出, 不同的电流设定电流输出纹波能满足稳定度要求; 随着电流设定值减小, 纹波的幅值逐渐增大符合占空比越小纹波越大的规律。从表 4 可以看出, CVS 方式采用普通的 ode45 求解器, 而 MOSFET+PWM 方式需要刚性求解器 ode23tb, 不同求解器的计算效率有明显差异; 在仿真的总步数、运行时间、运行仿真时间比、总过零检测数、总求解器复位数等关键仿真事件中, CVS 方式比 MOSFET+PWM 方式有明显优势; 增加延时单元, 在 CVS 方式中能有效消除代数环的影响, 过零检测成为主要仿真事件; 在 MOSFET+PWM 方式中, 延时单元的效果不明显, 过零检测和总步数是影响仿真效率的主要因素。

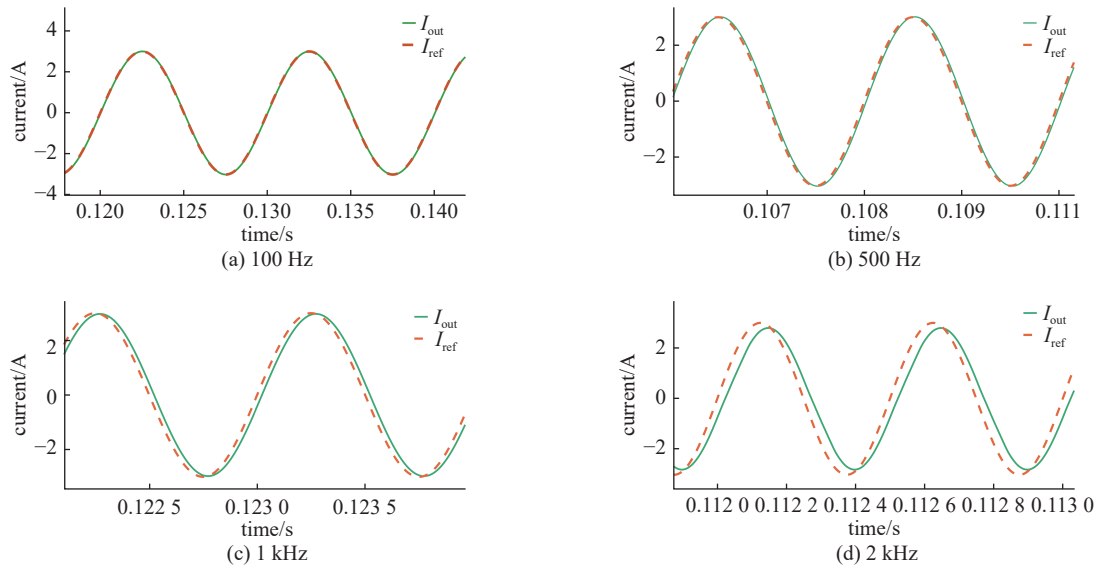


Fig. 6 Response of frequency

图 6 频率响应

表 4 关键仿真事件统计

Table 4 Statistics of key simulation events

model	solver	average step size	total steps	run time/s	run/sim time ratio	zero crossing source	zero crossing source triggered	total zero crossing	total solver reset	total solver exception	error control
CVS+delay	auto(ode45)	9.74E-07	307937	2.95	9.84	2	1	6430	6431	0	0
CVS	auto(ode45)	9.65E-07	310856	7.90	26.34	2	2	6648	6649	2	2
MOSFET+PWM	auto(ode23tb)	9.76E-09	30727523	492.37	1641.25	12	8	480019	480016	0	0
MOSFET+PWM+delay	auto(ode23tb)	9.79E-09	30654829	497.68	1658.93	12	5	498466	498464	0	0

4 结论

本文采用PI加二阶相位补偿方式在仿真层面实现了电源的设计要求,分析了电源的传递函数和频率特性,确定了一套电源参数。仿真结果显示采用该方法确定的参数可以满足电源的设计要求。同时,本文还验证了采用CVS作为仿真方法的可行性,仿真结果对比了MOSFET+PWM和CVS在仿真效率方面的差异和仿真结果的一致性。本文完成的仿真验证期望后续在实际电源上验证,进一步证实PI加二阶相位补偿的有效性。

参考文献:

- [1] 上海硬 X 射线自由电子激光装置正式开工建设[J]. 核技术, 2018, 41(5): 99. (Construction of Shanghai high repetition rate X-ray free electron laser and extreme light facility (SHINE) officially started[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(5): 99)
- [2] Wang D. SHINE: Shanghai high rep-rate XFEL and extreme light facility[C]//International Computational Accelerator Physics Conference. 2018.
- [3] 吴旭. 衍射极限储存环光源模拟调试研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2022: 21-23. (Wu Xu. Commissioning simulations of diffraction limited storage ring light source[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022: 21-23)
- [4] 尚雷, 尚风雷, 孙振彪, 等. 先进同步辐射光源特种电源概述[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 040002. (Shang Lei, Shang Fenglei, Sun Zhenbiao, et al. Overview of special power supplies for advanced synchrotron radiation source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 040002)
- [5] 王晓俊. 加速器磁铁电源解析模型最优控制方法[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2020: 9-10. (Wang Xiaojun. Analytic modeling optimal control method of power supply for accelerator magnet[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020: 9-10)
- [6] 杨新华, 王永强, 李继强, 等. 基于SSOGI-RLSMC联合算法的加速器电源纹波抑制[J]. 原子核物理评论, 2021, 38(1): 45-51. (Yang Xinhua, Wang Yongqiang, Li Jiqiang, et al. Accelerator power ripple suppression based on SSOGI-RLSMC combined algorithm[J]. Nuclear Physics Review, 2021, 38(1): 45-51)
- [7] 卢军祥, 马保慧, 柳恒敏, 等. 粒子加速器电源PID控制方式的改进型研究与应用[J]. 电气传动自动化, 2021, 43(3): 17-21,42. (Lu Junxiang, Ma Baohui, Liu Hengmin, et al. A research and application of improved PID control mode for particle accelerator power supply[J]. Electric Drive Automation, 2021, 43(3): 17-21,42)
- [8] Shao Zhuoxia, Liu Peng, Zhang Haiyan, et al. Research on a multilevel corrector magnet power supply based on a buck cascade circuit[J]. Nuclear Instruments

- and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 953: 163083.
- [9] 周兴文. 基于 BBO 算法的加速器电源数字控制器的设计与实现[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 22-41. (Zhou Xingwen. Design and implementation of digital controller for accelerator power supply based on BBO algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 22-41)
- [10] 疏坤, 龙锋利, 韩超. 加速器磁铁稳流电源的自适应型控制器设计[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(6): 1116-1122. (Shu Kun, Long Fengli, Han Chao. Self-adaptive controller design for accelerator stabilized magnet power supply[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(6): 1116-1122)
- [11] Song B M, Wang Ju. Mathematical modeling and analysis of a wide bandwidth bipolar power supply for the fast correctors in the aps upgrade controller[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 3264-3266.
- [12] 代天立, 张海燕, 邵琢瑕, 等. 合肥光源小功率直流磁铁电源的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 065103. (Dai Tianli, Zhang Haiyan, Shao Zhuoxia, et al. Research on NSRL-HLS low power DC magnet power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 065103)
- [13] Liu Kuobin, Liu Chenyao, Wang Baosheng, et al. Reliability assessment and improvement for a fast corrector power supply in TPS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 896: 53-59.
- [14] Belikov O V, Kozak V R. A family of precision power supplies for corrector magnets of the European X-ray free-electron laser[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, 61(5): 707-712.
- [15] 刘鹏, 龙锋利, 李洋, 等. 高能同步辐射光源储存环快校正磁铁电源设计[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(11): 2252-2257. (Liu Peng, Long Fengli, Li Yang, et al. Design of fast corrector magnet power supply for HEPS storage ring[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(11): 2252-2257)
- [16] Liu Peng, Wang Xu, Long Fengli. Fast corrector power supply design for HEPS[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(1): 56-62.
- [17] 王爽, 高朝晖, 陈思宇, 等. 基于 Simulink 的同步发电机仿真代数环问题研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(3): 482-489. (Wang Shuang, Gao Zhaohui, Chen Siyu, et al. Research on algebraic loop of synchronous generator simulation based on Simulink[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(3): 482-489)
- [18] 张俊峰. 原油换热网络 Simulink 动态仿真中提高运行速度的问题[J]. *系统仿真技术*, 2012, 8(4): 321-326. (Zhang Junfeng. Improve the convergent speed in oil heat exchanger networks Simulink dynamic simulation[J]. *System Simulation Technology*, 2012, 8(4): 321-326)
- [19] 耿华, 杨耕. 控制系统仿真的代数环问题及其消除方法[J]. *电机与控制学报*, 2006, 10(6): 632-635. (Geng Hua, Yang Geng. Algebraic loop problems in simulations of control systems and the methods to avoid it[J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(6): 632-635)