

文章编号: 1007-4627(2021)01-0045-07

基于 SSOGI-RLSMC 联合算法的加速器电源纹波抑制

杨新华¹, 王永强¹, 李继强², 崔渊², 高大庆², 郑越¹

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 重离子加速器电源系统对励磁电源输出电流的稳定度和纹波精度要求高。磁铁负载的存在产生的纹波, 会对加速器通过磁场精确控制粒子运动轨迹带来影响。针对以上问题, 提出一种基于 SSOGI-RLSMC 新型联合算法, 以减小磁铁负载影响下励磁电源输出的电流纹波, 提高电流稳定度。新型联合算法通过并联型二阶广义积分器 (SSOGI) 作为纹波检测器对纹波分量进行快速准确的提取, 获得精度较高的指令电流; 将指令电流和直流有源电力滤波器的补偿电流相减得到误差信号, 利用趋近律滑模控制 (RLSMC) 算法对误差信号进行动态跟踪和补偿, 以提高直流有源滤波器对励磁电源输出电流的纹波抑制能力, 进而达到对粒子运动轨迹精确控制的目的。最后通过 Matlab/Simulink 仿真证明, 所提的新型联合算法在以直流有源电力滤波器为主补偿手段的励磁电源中有效提高了励磁电源输出电流的精度和稳定度, 改善了直流有源滤波器对纹波电流的抑制能力。

关键词: 纹波检测; 并联型二阶广义积分器; 趋近律滑模控制; 直流有源电力滤波; 纹波抑制

中图分类号: TP273.5

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020042

1 引言

磁铁电源系统是重离子加速器的重要组成部分, 大量非线性器件应用于磁铁电源中, 严重地影响了电源的正常运行^[1]。电源的输出指标决定了加速器束流品质, 一般要求加速器磁场恒定或规律变化, 并根据电源不同工作状态进行调整, 通过控制磁铁电源的输出电流, 实时控制磁场的变化, 达到约束粒子运动轨迹的目的^[1-2], 因此对重离子加速器电源输出电流精度和稳定度的控制至关重要。

磁铁电源中电流纹波是影响其精度的主要因素之一。通过采集电源输出电流波形分析发现, 电流纹波主要以 50, 100 Hz 等低频交流信号为主^[3-4], 直流有源滤波器 (Direct Current Active Power Filter, DCAPF) 被广泛应用于低频纹波的抑制, 针对磁铁电源的电流纹波抑制研究, 目前主要集中在 DCAPF 纹波电流检测和补偿精度控制两个方面。纹波电流检测方法的好坏直接影响着 DCAPF 的纹波抑制效果, 文献^[5]提出了一种复合二阶广义积分器 (Composite Second Order Generalized Integrator, CSOGI) 的谐波检测方法, 以准确锁定电网相位角和频率; 文献^[6]采用改进电流平均值法

代替传统 dq 检测算法中低通滤波器 (Low Pass Filter, LPF) 模块进行谐波分量的提取, 但在检测精度方面还存在不足; 针对提高补偿精度与系统稳定性并能够提高谐波补偿的效率, 提出了许多控制算法^[7-12], 文献^[13]提出的滑模多比例谐振控制, 验证了多比例谐振滑模控制具有更强的鲁棒性, 更小的跟踪误差和更低的 (Total Harmonic Distortion, THD), 文献^[14]在对电感大小与系统延迟关系进行阐述后, 提出了预测电流控制方法, 即对 DCAPF 输出电流采取超前一拍预测, 并验证控制方法能够减小控制器延迟问题, 有效提高系统补偿性能和鲁棒性。但以上算法计算量较大, 对处理器的性能要求更高。

针对上述磁铁电源的电流纹波抑制问题, 本文以 DCAPF 为主电路, 提出一种并联型 SOGI 与趋近律滑模控制 (Shunt Second Order Generalized Integrator-Reaching Law Sliding Mode Control, SSOGI-RLSMC) 联合算法, 从纹波检测和补偿精度两个方面提高 DCAPF 纹波抑制能力。首先用 SSOGI 作为纹波检测器获取直流有源电力滤波器的指令电流, 同时采用趋近律滑模控制对有源电力滤波器的补偿电流与指令电流之差进行动态跟踪与补偿, 进而提高直流有源电力滤波器对纹波电流的抑制能力。

收稿日期: 2020-06-22; 修改日期: 2020-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11405239); 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLL-DJ052016011)

作者简介: 杨新华 (1966-), 男, 甘肃定西人, 教授, 从事电力电子技术应用; E-mail: yangxhem@163.com。

根据图 2 所示的 SOGI 结构，可以推导出输入信号 i 到误差 e 的误差传递函数：

$$E(s) = D(s) = \frac{e}{i}(s) = \frac{s^2 + w'^2}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (3)$$

图 4 为 $Q(s)$ 和 $E(s)$ 的波德图。可以看出，输入信号频率 w 超过中心频率 w' 时，输出信号的相角就会产生 180° 的跳变。

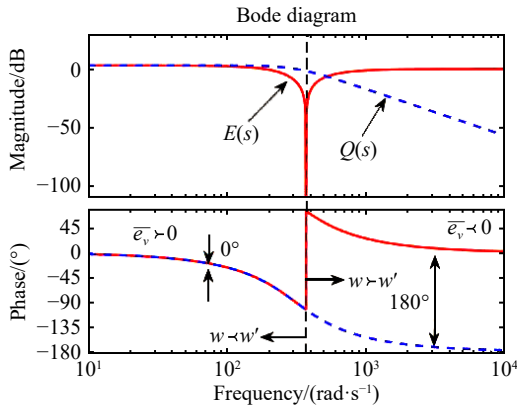


图 4 (在线彩图) $E(s)$ 传递函数伯德图

从图 4 中可以看出，单级 SOGI 只有当 $w = w'$ 时才具有较好的效果，在 w 未知情况下，需要准确估计 w' ，为此引入了 FLL 环节，具体如图 5 所示。从图 5 中可以

看出，将 FLL 环节进行了修改，该结构能够更快速、更精确地估计纹波信号的频率变化，从而实现频率的自适应调整，其中 i_{α}^* 与 i_{β}^* 分别为检测到的纹波电流信号。

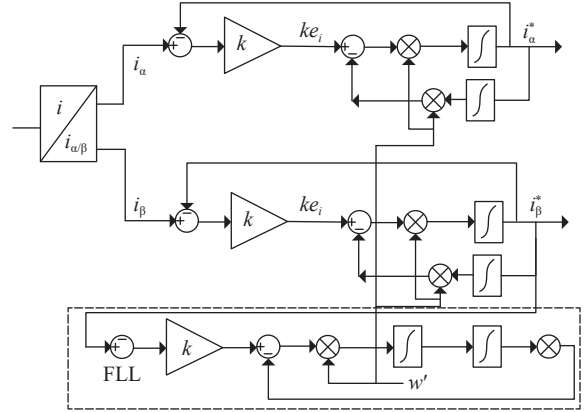


图 5 SSOGI-FLL 结构图

为分析同相电流振幅 I_{α} 和正交相电流振幅 I_{β} 与频率、阻尼系数之间关系，分别以频率比 w/w' 从 0.8 到 1.2 和阻尼系数 k 从 0.5 到 2 的变化来模拟检测到的加速器电源电流纹波的频率。图 6 显示出频率比和 k 值对同相和正交相输出有很大影响，特别是当输入信号的幅值和频率发生波动时， k 值对同相和正交相输出影响更大。

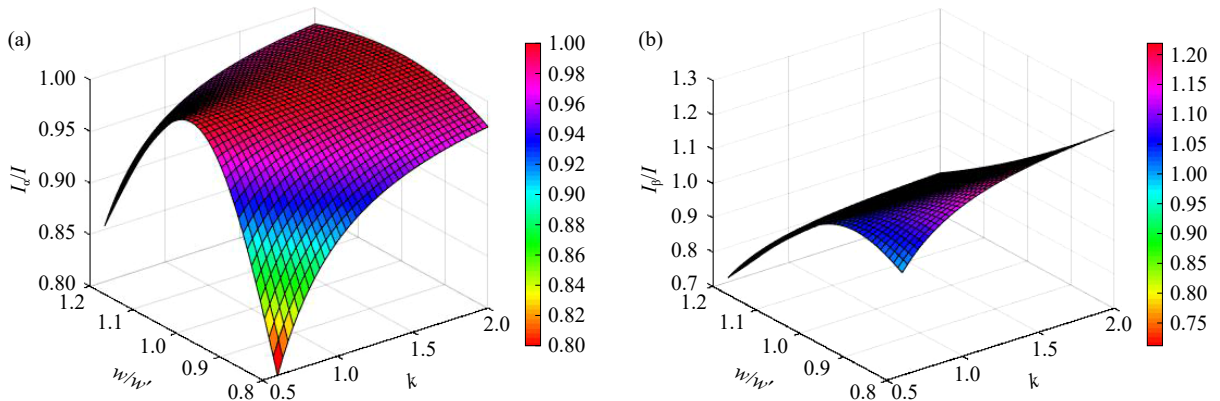


图 6 (在线彩图) 频率比和 k 值对同相 (a) 和正交相 (b) 输出的影响

从图 7(a) 和 (b) 所示的输入相位-输出电流曲线可以看出 k 值越高， I_{α} 与 I_{β} 线性越好。与 I_{β} 相比， I_{α} 减少了电流变化，增加 k 有利于减小方差，提高纹波电流检测精度。

同时阻尼系数可由图 6 的电流方差确定，并重新绘制为 2D，如图 7 所示，从图中可以看到 k 越大，同相电流振幅越小，并且改善了 I_{α} 与 I_{β} 的线性关系，提高了暂态响应的稳定性。

综上所述，输入信号频率的变化是同相和正交相电流振幅产生变化的关键点，阻尼系数是 SSOGI 单元的

关键参数，直接影响纹波电流的检测精度。

4 趋近律滑模控制算法

4.1 滑模面的选取

本文的 DCAPF 是一个电压源逆变器，通过本文提出的 SSOGI 纹波检测算法检测出纹波指令电流 i_c^* ，令 $x = i_c$ ， i_c 为 DCAPF 输出的补偿电流，由 DCAPF 的数学模型可得

$$x = f(x) + bu, \quad (4)$$

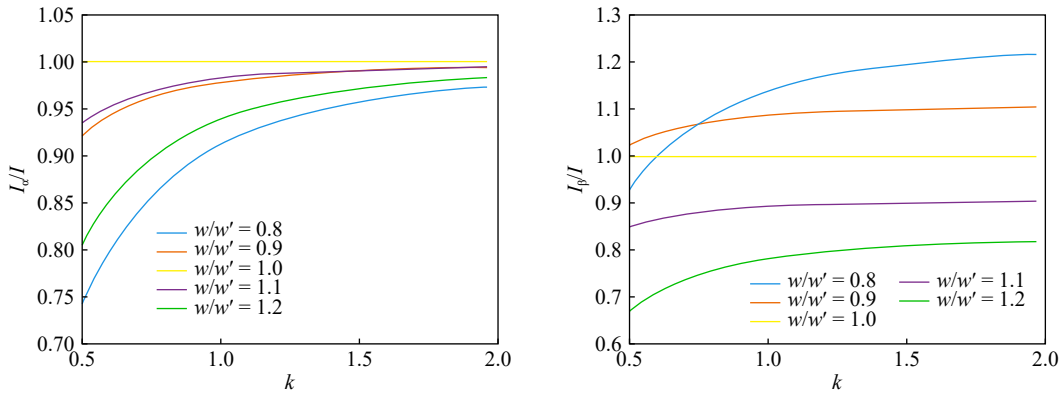


图 7 (在线彩图) 输入相位-输出电流曲线

式中 $f(x) = -\frac{U_s + Ri_c}{L}$, $b = -\frac{U_{dc}}{L}$ 。

首先, 定义跟踪误差为

$$e = x_d - x, \tag{5}$$

其中, $x_d = i_c^*$ 为检测出的纹波指令电流, x 为 DCAPF 输出的补偿电流。

DCAPF 电流跟踪控制环节的主要任务是实时准确跟踪检测出纹波指令电流, 选取滑模面为

$$s = e = x_d - x. \tag{6}$$

对式 (6) 两端进行求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_d - \dot{x} \\ &= \dot{x}_d - f(x) - bu \\ &= \dot{x}_d + \frac{U_s}{L} + \frac{R}{L}i_c - \frac{U_{dc}}{L}u. \end{aligned} \tag{7}$$

4.2 控制律设计

趋近律滑模控制 (RLSMC) 包括趋近和滑模两个过程, 趋近过程为 $s \rightarrow 0$, 这与前面提到的假设一致。Super-Twisting 二阶滑模控制将传统滑模控制中不连续的高频切换项以时间上的积分形式出现在控制律中, 从而获得连续的控制信号。由于 Super-Twisting 算法存在积分过程, 无法满足本文对纹波实时跟踪控制的要求, 并且增加了算法的复杂度, 故提出 RLSMC, 趋近速度从一较大值逐步减小到零, 不仅缩短了趋近时间, 同时为保证在有限时间内使得 s 接近零, 令 $s = -\varepsilon \text{sgn}(s)$ 。

基于上述分析, 本文所用滑模控制律为

$$u(t) = \frac{1}{b} \left[\varepsilon \text{sgn}(s) + ks + c \left(\dot{\theta}_d - \dot{\theta} \right) + \theta_d + \dot{f}(\theta, t) \right], \tag{8}$$

取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2, \tag{9}$$

对上式两端求导, 并由式 (7) 和式 (8) 可得

$$\dot{V} = s \left(\dot{x}_d + \frac{U_s}{L} + \frac{R}{L}i_c - \frac{U_{dc}}{L}u \right). \tag{10}$$

当 $s > 0$ 且 $U_s + Ri_c < U_{dc}$ 时, $\dot{s} < 0$; 当 $s < 0$ 且 $u = 0$ 时, $\dot{s} > 0$ 。由此可证明, 改进的算法在有限时间内是收敛的, 满足滑模控制的可达性, 系统稳定。

5 仿真分析

为了验证基于 SSOGL-RLSMC 联合算法在纹波抑制方面具有更高的纹波检测精度和补偿精度、更快的响应速度, 本文在 MATLAB/Simulink 搭建如图 1 所示的系统模型进行仿真分析。鉴于对电源输出的纹波进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析后发现实际纹波主要是以 50, 100, 150 Hz 为主的低频成分, 因此利用表 1 中系统参数, 并设置式 (11) 纹波电流源对整个 DCAPF 系统进行仿真验证。

$$i_s = I_d + i_c = 100 + 0.2 \sin(\omega t) + 0.5 \sin(2\omega t) + 0.1 \sin(3\omega t). \tag{11}$$

表 1 系统仿真参数

参数	说明	参数值
DC	直流	100 A
R_L/L_L	非线性负载	0.5 Ω /4 mH
L	滤波电感	1 mH
R	等效电阻	1 Ω
C_f	直流侧电容	1 mF
L_f	直流侧电感	0.1 mH

5.1 纹波检测精度仿真实验

图 8 为采用三种纹波提取方式得到的谐波分量。

从图 8 中可以看出, 改进电流平均值法需要 20 ms 得到较准确的纹波, 电源纹波系数为 10^{-4} , 而传统的低通滤波器需要 50 ms 延时才能得到检测结果, 电源纹波

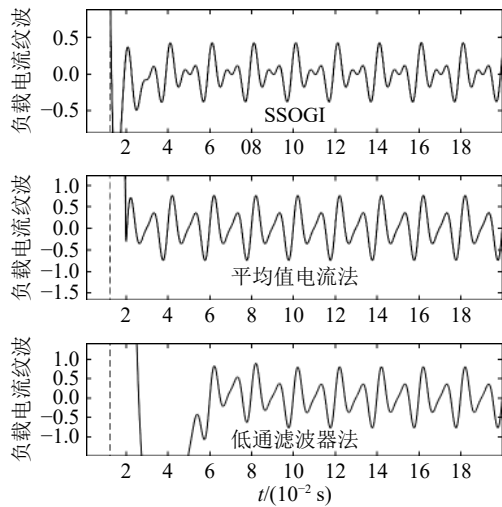


图 8 纹波提取对比图

系数为 10^{-4} ，本文采取的 SSOGI 纹波检测方法只需 10ms 即可分离出纹波，电源纹波系数为 10^{-5} ，速度最快，延时最小，而且提高了纹波检测精度。

5.2 纹波补偿仿真实验

图 9 为未投入 DCAPF 时的电流波形与频谱分析。

由图 9 可知，在 DCAPF 补偿前 THD 为 1.06%，其主要为 50、100、150 等低频纹波含量较高。

图 10 在仿真时间 0.1s 时投入 DCAPF，通过传统的 PI 对 DCAPF 控制。理论上 DCAPF 可以抵消检测到的纹波，进而获得直流分量。通过图 10 可以看到，负载电流很快补偿到直流 200A，经过计算，此时电源纹波系数达到 10^{-4} ，电流纹波相对于直流的 THD 为 0.12%。

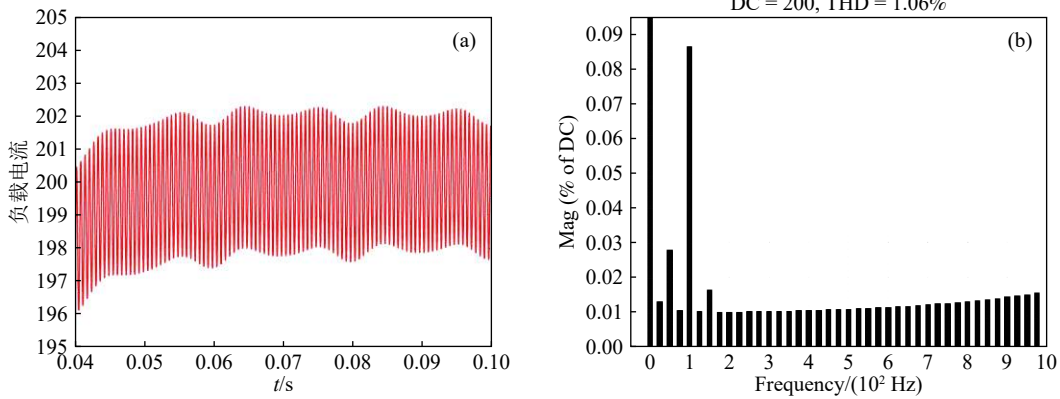


图 9 (在线彩图) 电流波形 (a) 与频谱图 (b)

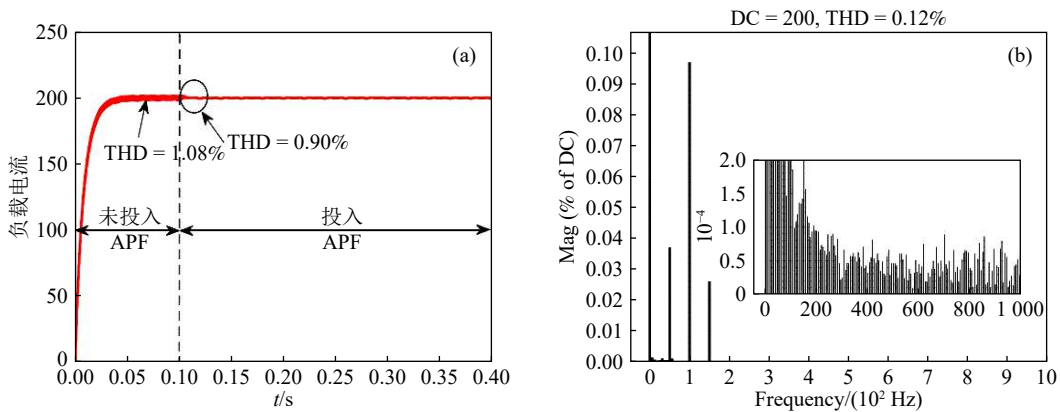


图 10 (在线彩图) 未加 RLSCM 控制电流波形 (a) 与频谱图 (b)

图 11 为基于趋近律滑模控制的控制策略加入 DCAPF 中所得到的负载电流波形及频谱分析图，由于趋近律滑模控制的加入，使得 RLSCM 控制器能够快速对指令电流的变化做出响应，体现较强的跟踪能力，纹波指令电流的跟踪性能明显改善，利用纹波电流的计算公式对检测到的纹波电流计算其纹波系数，最终得到电源纹波系数达到 10^{-5} ，电流纹波相对于直流的

THD 为 0.10%。图 10(a) 和图 11(a) 中圆圈所标记的为负载突变阶段，从图中可以看出，负载突变后，经过趋近律滑模控制的电流纹波的 THD 由 0.99% 降至 0.64%，通过搭建的仿真模型进行仿真，可以看出趋近律滑模控制算法实现了纹波电流的精确跟踪与补偿，并且在负载突变的情况下，趋近律滑模控制策略具有更优越的动态跟踪和补偿性能。

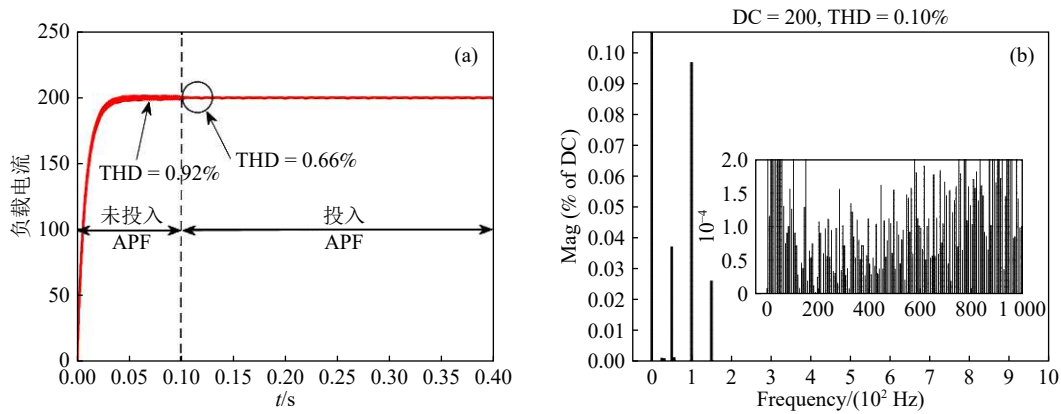


图 11 (在线彩图)加RLSMC控制电流波形(a)与频谱图(b)

6 结论

本文采用 SSOGI-RLSMC 新型联合算法，以 SSOGI 作为纹波检测器，对励磁电源输出电流的纹波进行检测，分析了纹波检测精度及检测速度。仿真结果表明，SSOGI 与其他传统纹波检测算法相比较，可以对纹波分量快速分离，并获得较高精度，有利于为 DCAPF 提供准确的指令电流；以 RLSCM 作为电流跟踪控制器，对指令电流与 DCAPF 补偿电流的差值进行动态跟踪与补偿，分析了 RLSCM 动态补偿性能及抗扰能力。仿真结果表明，RLSCM 能够对差值信号进行快速跟踪，并在负载突变时，能够有效的抑制抖动，降低 THD，有效提升了系统动态品质。本文研究的 SSOGI-RLSMC 联合算法能更好地检测并跟踪纹波电流，提高补偿精度，使得补偿后的电流纹波系数更小。

参考文献:

[1] KIM H W, HONG B H, KANG J. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(04): 1.
 [2] ALGORITHM S. Energy Weekly News, 2018, 158: 324.
 [3] WANG Youyun, GAO Daqing, DING Junhuai, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(4): 499. (in Chinese)
 (王有云, 高大庆, 丁军怀, 等. 原子能科学技术, 2010, 44(4): 499.)
 [4] YANG Xinhua, WANG Zhiqiang, HUANG Yuzhen, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(09): 1722. (in Chinese)

(杨新华, 王志强, 黄玉珍, 等. 原子能科学技术, 2018, 52(09): 1722.)
 [5] JIA Chuansheng, MENG Fanting, LIU Zhenzhong. Electric Measurement and Instrumentation, 2019, 56(20): 57. (贾传圣, 孟凡婷, 刘振中. 电测与仪表, 2019, 56(20): 57.)
 [6] ZHOU Lin, Meng Jing, LIU Qiang, et al. Power Electronics Technology, 2008(07): 21. (in Chinese)
 (周林, 孟婧, 刘强, 等. 电力电子技术, 2008(07): 21.)
 [7] MARIN R C, FRAPPE A, KAISER A. IEEE Transactions on Circuits&Systems I Regular Papers, 2017(99): 1.
 [8] ZOU Changyue, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(2): 411. (in Chinese)
 (邹常跃, 刘邦银, 段善旭, 等. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 411.)
 [9] ZHANG H, TAN Z, NGUYEN K. Electronics Letters, 2018, 53(25): 1663.
 [10] YANG Xinhua, WANG Zhiqiang, HUANG Yuzhen, et al. Electric Transmission, 2018, 48(07): 87. (in Chinese)
 (杨新华, 王志强, 黄玉珍, 等. 电气传动, 2018, 48(07): 87.)
 [11] XU Zhongxiong, WANG Fangan, QI Xin. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2003(07): 637. (in Chinese)
 (徐中雄, 王放安, 齐欣. 高能物理与核物理, 2003(07): 637.)
 [12] WANG Hao, LUO An, XU Qianming, et al. Power System Automation, 2016, 40(20): 107. (王皓, 罗安, 徐千鸣, 等. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 107.)
 [13] SONG J. Electronics Letters, 2017, 53(2): 1394.
 [14] MANNEN T, FUKASAWA I, FUJITA, H. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 54.
 [15] LI Zhijun, WANG Lijuan, ZHANG Yanman, et al. Power System and Automation, 2020, 32(06): 36. (in Chinese)
 (李志军, 王丽娟, 张奕楠, 等. 电力系统及其自动化报, 2020, 32(06): 36.)

Accelerator Power Ripple Suppression Based on SSOGI-RLSMC Combined Algorithm

YANG Xinhua^{1,1)}, WANG Yongqiang¹, LI Jiqiang², CUI Yuan², GAO Daqing², ZHENG Yue¹

(1. Lanzhou University of Technology College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou 730050, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Institute of Modern Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The power supply system of heavy ion accelerator requires high stability and ripple precision of excitation power supply. Because of the existence of magnet load, the ripple has an impact on the precise control of particle trajectory by magnetic field. To solve the above problems, a new combined algorithm based on SSOGI-RLSMC is proposed to reduce the output current ripple of excitation power supply under the influence of magnet load and improve the current stability. The new joint algorithm extracts the ripple component quickly and accurately by using the parallel Second-Order Generalized Integrator(SSOGI) as the ripple detector, and obtains the command current with high precision. The error signal is obtained by subtracting the command current and the compensation current of the DC active power filter, and the Reaching Law Sliding Mode Control(RLSMC) algorithm is used to track and compensate the error signal dynamically, so as to improve the direct current active power filter can suppress the ripple of the output current of the excitation power supply, so as to achieve the precise control of the particle trajectory. Finally, through MATLAB/Simulink simulation, it is proved that the new joint algorithm can effectively improve the accuracy and stability of the output current of the excitation power supply, and improve the ripple current suppression ability of the DC active power filter.

Key words: ripple detection; parallel second order generalized integrator; approach law sliding mode control; DC active power filter; ripple suppressio

Received date: 22 Jun. 2020; **Revised date:** 02 Aug. 2020

Foundation item: National Nature Science Foundation of China(11405239); Openness Foundation of State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology(SKLL-DJ052016011)

1) E-mail: yangxhem@163.com.