

## 采用多模式控制的电磁发射蓄电池充电谐波抑制方法\*

周仁, 鲁军勇, 龙鑫林, 魏静波, 柳应全, 吴羿廷

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北武汉 430033)

**摘要:**针对电磁发射蓄电池组大倍率快速充电过程中的电网谐波陡增问题,提出多模式模糊滞环控制谐波抑制方法。结合电磁发射混合储能系统的时序串联拓扑结构,说明蓄电池的超大倍率充电应用工况和策略,进而介绍蓄电池充电的拓扑结构,明确谐波的来源、特点和产生原因。在分析单台充电机充电时的电网谐波电压和谐波电流的基础上,研究不同充电机并充台数、不同充电电流情况下电网谐波电压和谐波电流的分布规律。设计多模式控制方法的组成方式和切换判据,建立蓄电池充电机、瞬时无功功率检测、谐波抑制、多模式控制的仿真模型。仿真和试验数据表明:谐波抑制方法能够快速抑制电磁发射蓄电池充电机大规模启停、波动时的谐波陡增问题,补偿效果满足国家标准。

**关键词:**电磁发射;谐波;蓄电池;多模式控制;有源电力滤波器

**中图分类号:**TM832 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)04-060-06

## Harmonic suppression method of battery charging for electromagnetic launch with multi-mode control

ZHOU Ren, LU Junyong, LONG Xinlin, WEI Jingbo, LIU Yingquan, WU Yiting

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** A harmonic suppression method with multi-mode fuzzy hysteresis control was proposed for the rapid increase problem of grid harmonics in large-rate rapid charging of battery for electromagnetic launch. Based on the timing series topology of the hybrid energy storage system for electromagnetic launch, the special application conditions and large-rate charging strategy of the battery were explained. The topology of the battery charging was introduced, and the source, characteristics and causes of the harmonics were clarified. Based on the analysis of the harmonic characteristics of a single charger, the distribution of harmonic voltage and current of the power grid under different charging currents and the number of chargers were studied. The multi-mode control method and its switching criteria were designed. The simulation model of the charger, instantaneous reactive power detection, harmonic suppression and multi-mode control were established. Simulation and experimental data show that the multi-mode control method can quickly suppress the harmonic abrupt increase of the large-scale start, stop and fluctuation of the chargers, and the compensation effect satisfies the national standards.

**Keywords:** electromagnetic launch; harmonic; battery; multi-mode control; active power filter

舰载电磁发射混合储能系统由蓄电池和脉冲电容器组成,在发射过程中持续输出兆焦级的能量,实现了高能量密度和高功率密度的紧密结合<sup>[1]</sup>。在两次发射的间隙,整个蓄电池组同时从电网进行快速充电以补充下一次发射的能量,大量整流设备同时接入电网会带来谐波畸变问题。舰载电磁发射电网为舰船的通信、指挥、照明等设备供电时,必须保证各个设备用电符合标准,以确保电网供电的安全可靠。

谐波会对电气设备带来诸多危害,如使电机

发热、引发串并联谐振、增加变压器损耗、影响精密仪器测量、干扰通信等<sup>[2]</sup>。刘刚等<sup>[3]</sup>采用坐标变换的方法抑制了永磁同步电机运行时的谐波,通过积分控制抑制了谐波电流。姚骏等<sup>[4]</sup>提出的交叉耦合控制策略,能有效抑制并网时的低次谐波电流。Jain等<sup>[5]</sup>采用模糊控制方法有效抑制了谐波,并与积分控制进行了比较,仿真和实验结果验证了模糊控制方法具有更好的暂态响应性能。谐波抑制控制方法包括积分控制、无差拍控制、重复控制、滞环控制、滑模控制、空间矢量控

\* 收稿日期:2018-04-28

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51522706,51407191,51607187,51307176,51207162,51477179);国家重点基础研究发展计划资助项目(613262)

**作者简介:**周仁(1990—),男,湖北荆门人,博士研究生,E-mail:mszrl388@163.com;

鲁军勇(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:jylu@xinhuanet.com

制、单周控制、三角载波控制等<sup>[6-8]</sup>。但对于电磁发射系统充电时大量非线性负载同时启停、放电时用电需求极少且系统要求高压隔离的问题,单一的控制方法无法针对各种状态实现良好的谐波抑制。

本文根据电磁发射蓄电池组充电模式和产生谐波的特点,采用瞬时无功功率的谐波检测方法,将指令控制、模糊控制和滞环控制方法结合后应用到有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)的控制当中,实现了谐波的有效抑制。

### 1 电磁发射蓄电池充电拓扑

电磁发射混合储能系统是整个电磁发射系统的能量源泉,包括多个蓄电池组,每个电池组分别由独立的充电机进行充电,整个充电机组同时由舰载电网进行供电。电磁发射混合储能系统放电时电压等级达到了 10 kV,为直流高压系统,将电池分组后分别由交流 380 V 电网进行充电,在降低对电网的电压等级需求的同时提高了充电的安全性、均衡性。每个电池组单独向对应的脉冲电容放电,然后脉冲电容向负载放电,实现了功率等级的逐级放大。电磁发射混合储能系统如图 1 所示。

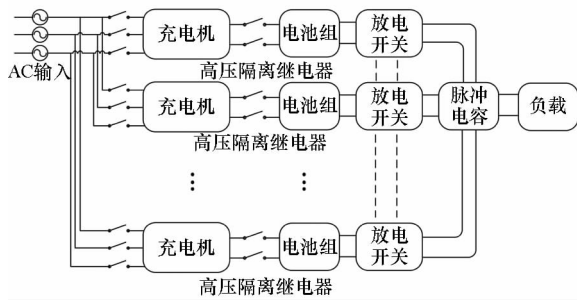


图1 电磁发射混合储能系统拓扑

Fig. 1 Topology of hybrid energy storage system for electromagnetic launch

由图 1 可知,蓄电池组充电时为低压系统,放电时为高压系统,充电结束后断开高压隔离继电器以实现系统高低压隔离。充电时电磁发射系统处于静默状态,电网只存在固定的充电机负载。对于谐波抑制,这种充放电工况切换降低了全周期的实时跟踪响应能力,但提高了应对谐波周期性剧烈变化的要求。充电机的内部拓扑如图 2 所示。

充电机实现了整流—逆变—隔离—整流—直流输出的功能。尽管这种拓扑方式对于单个蓄电池组充电而言可靠性高、隔离性好,但电磁发射系统要求整个蓄电池组快速大倍率充电,总功率

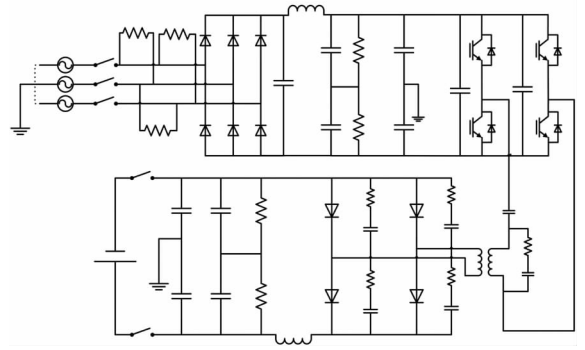


图2 电磁发射蓄电池组充电机拓扑

Fig. 2 Topology of battery charger for electromagnetic launch

4 MW的不控整流器件同时接入电网时,不可避免地会带来谐波问题。

### 2 充电谐波分析

电磁发射蓄电池组充电机为三相非线性平衡负载,三相之间谐波幅值相同,可选取任意线电压进行测量研究。通过谐波分析仪和示波器测量各种充电工况下的电网波形,在仿真软件中通过傅立叶谐波分析提取谐波特征参数。不同充电电流半个周期的线电压如图 3 所示。

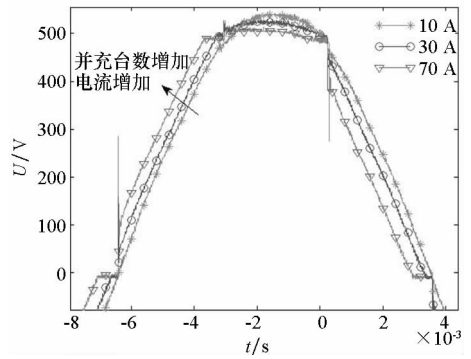


图3 蓄电池组充电电网电压畸变

Fig. 3 Distortion of power grid voltage during battery charging

由图 3 可知,随着并联充电的充电机台数的增加,输出电流增大,电压波形畸变越严重,毛刺越多,与不充电时标准的电网波形的主要区别在于正弦波顶部被削除,在波形过零点处出现大幅度不连续拐点。将充电机组 70 A 同时并充时的波形与无负载波形作差得到谐波电压,谐波电压呈周期性规律变化,不考虑毛刺尖峰则最大幅值不到 100 V,如图 4 所示。

记录谐波电压的同时测量电网谐波电流,16 台充电机同时以 10 A、30 A、60 A 和 70 A 充电时,半个周期的谐波电流如图 5 所示。

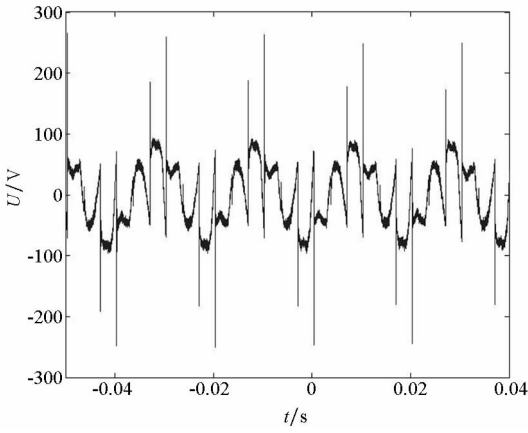


图 4 蓄电池组充电谐波电压

Fig. 4 Harmonic voltage of battery charging

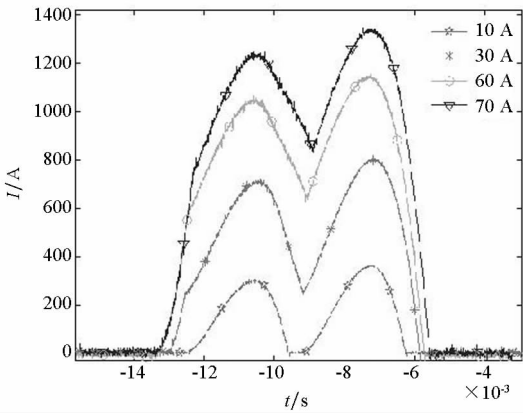


图 5 蓄电池组充电谐波电流

Fig. 5 Harmonic current of battery charging

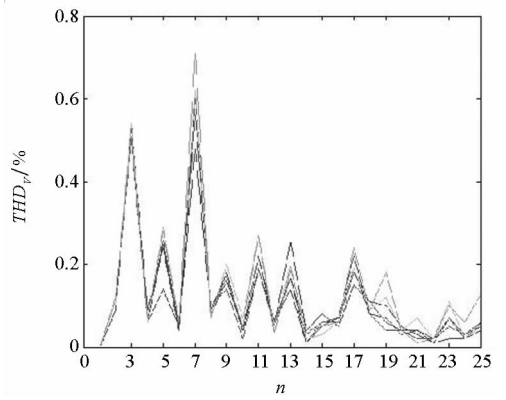


图 6 单台充电机充电时电网谐波电压分布

Fig. 6 Distribution of harmonic voltage when a single charger charging

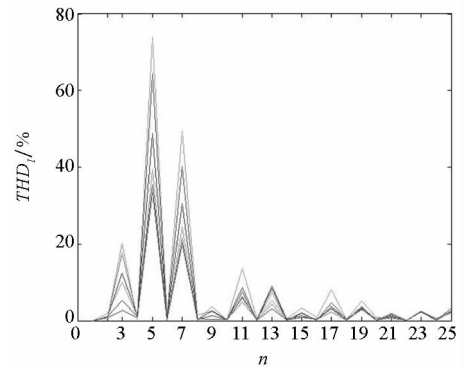


图 7 单台充电机充电时电网谐波电流分布

Fig. 7 Distribution of harmonic current when a single charger charging

与电压畸变增大的趋势不同,随着充电电流幅值的增大,波形中间的凹陷逐步变小,更趋近于正弦波,波形畸变率逐渐减小。对谐波数据进行傅立叶分析时,由于 25 次以上更高次谐波的总幅值较小,且国家标准中针对谐波次数的限制只达到了 25 次,因此主要分析 25 次以下的谐波。单台充电机不同电流充电时谐波电流及谐波电压 25 次以内谐波分布如图 6 ~ 7 所示。图中以谐波电压畸变率 (Total Harmonic Voltage Distortion,  $THD_V$ ) 和谐波电流畸变率 (Total Harmonic Current Distortion,  $THD_I$ ) 来表征谐波的变化。

在图 6 和图 7 中,不同曲线代表不同充电电流时的谐波分布,图中横坐标数值代表有对应峰值的谐波次数。由图可以发现,不同充电电流时谐波电压和谐波电流变化趋势相似,主要集中在 3、5、7、11、13、17、19 次谐波,其中 3、5、7 次谐波占了总谐波的绝大比重。

3、5、9、12、15、16 台充电机 10 A 充电时谐波电压变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知,随着并充台数的增加,  $THD_V$  逐渐增大,其中 5、7、11、13、17 次谐波有较为明显的增加趋势。当并充台数

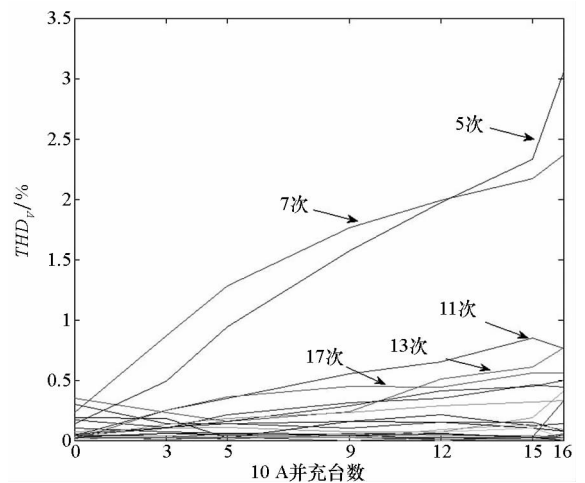


图 8 谐波电压随并充台数变化趋势

Fig. 8 Harmonic voltage changes with the number of chargers in parallel

较少时,7 次谐波所占比例比 5 次谐波大;随着并充台数的增加,5 次谐波增长速度最快,成为主要的谐波成分。

充电机组 30 A、60 A、70 A 充电电流同时并充时谐波电流变化趋势如图 9 所示。由图 9 可

知,谐波电流的变化规律与谐波电压变化规律不同,随着充电电流的增加,THD<sub>i</sub>反而降低,其中3、5、7、11、13次谐波为主要谐波成分。

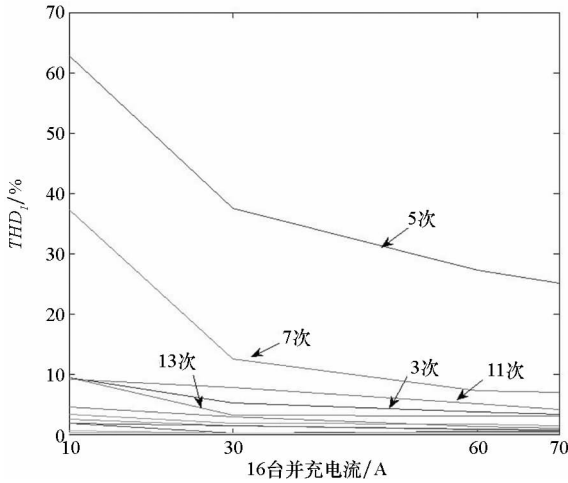


图9 谐波电流随充电电流变化趋势  
Fig.9 Harmonic current changes with the number of chargers in parallel

随着充电电流的增加,各次谐波的THD<sub>v</sub>相应增大,呈正比例关系,THD<sub>i</sub>则随输出电流增大而减小,说明充电机全功率运行时THD<sub>i</sub>最小而THD<sub>v</sub>最大。尽管掌握了充电机组的谐波分布规律能够指导实际应用,如恒流充电阶段尽量使充电机运行在额定功率状态,但电磁发射系统为了达到大倍率快速、均衡充电的要求,不可避免地需要充电机组能够灵活切换各种工况,同时谐波畸变率超过了5%的国家标准,必须采取措施抑制谐波。

### 3 模糊滞环谐波抑制方法

根据电磁发射充放电的应用工况和谐波的特点,提出基于瞬时无功功率检测下多模式模糊滞环控制的有源电力滤波器谐波抑制方法。

多模式控制的思想早在20世纪70年代已经被提出,对于一些比较复杂的系统,在一定条件下,多模式控制具有更强的鲁棒性<sup>[9-10]</sup>。多模式模糊滞环控制方法由指令控制方法、滞环控制方法和模糊控制方法结合而成。

指令控制:电磁发射系统蓄电池分为充电储能、放电发射和维护静置三种工况,只有蓄电池充电时需要进行谐波抑制,蓄电池放电、维护时电网中最大的谐波源充电机已关闭,通过指令控制使APF进入休眠模式,并使有源滤波器与电网、电磁发射系统高压部分脱开。

滞环控制:APF的输出电流在两倍滞环宽

度之间跟踪谐波电流。充电机组同时启动后进入恒流充电模式,此时整个电磁发射放电系统处于静默状态,电网只有充电机组作为单一负载,此时电网电流、电压畸变处于恒定状态。选定好滞环宽度后,开关频率被控制在一定范围内,避免了滞环控制时开关频率波动不可控的缺陷。

模糊控制:模糊控制方法是针对大功率充电机组同时启停机、恒压模式、异常故障时电流波动较大的情况。通过参考电流与实际电流的偏差以及偏差的变化率制定模糊调节规则,使谐波波动时滞环宽度能够跟随波动在一定范围内灵活调节,从而防止滞环控制过程中的开关频率大范围波动问题。

多模式控制内部模式切换以滞环宽度作为判定依据,这三种方法的具体组合结构如图10所示。

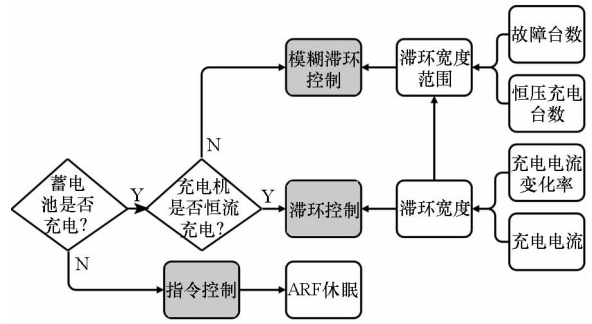


图10 多模式模糊滞环控制方法

Fig.10 Multi-mode fuzzy hysteresis control method

搭建多模式模糊滞环控制APF谐波抑制模型,通过对比APF运行前后谐波情况以验证模型的有效性。在充电机的仿真模型基础上增加APF,并在匹配主回路的参数基础上采用多模式控制进行谐波抑制,如图11所示。

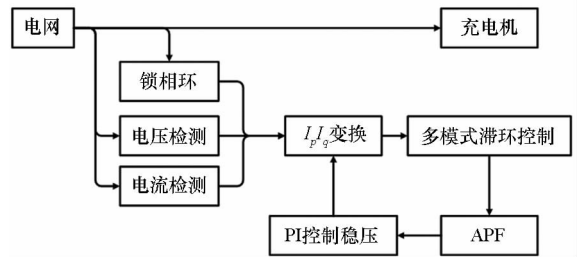


图11 APF谐波抑制仿真模型

Fig.11 Simulation model of APF harmonic suppression

模型包括滞环宽度控制部分、滞环控制部分和脉宽信号生成部分,滞环宽度控制部分有三个输入,分别是充电状态指令、电流偏差和电流偏差变化率。模糊控制规则如表1所示,其中模糊语

言规则为 { 负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB) }。

表 1 滞环宽度模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy control rule of hysteresis width

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

将模糊规则表转化为三维图,则滞环宽度的部分模糊规则如图 12 所示。

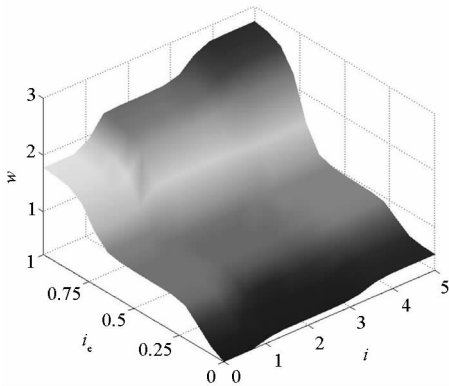


图 12 解耦后滞环宽度模糊规则

Fig.12 Fuzzy control rule of hysteresis width after decoupling

图 12 中,  $w$  表示无量纲滞环宽度,  $i$  表示无量纲偏差电流,  $i_c$  表示无量纲偏差电流变化率, 三种输入信号通过幅值比例变换后共同影响滞环宽度。采用多模式模糊滞环控制后电网侧电流、电压仿真结果如图 13、图 14 所示。

仿真结果表明多模式控制方法能够迅速有效地抑制充电机带来的谐波, 电流、电压谐波畸变率均低于 1%, 满足国家标准。

### 4 谐波抑制实验

为了进一步直观地验证谐波电压、电流抑制前后的变化规律, 采用谐波分析仪监测电网谐波变化, 并根据谐波抑制策略在电网与负载间并联 APF 进行谐波抑制, 通过对比并联 APF 前后电网波形的变化判断谐波抑制的效果, 对比波形如图 15 所示。

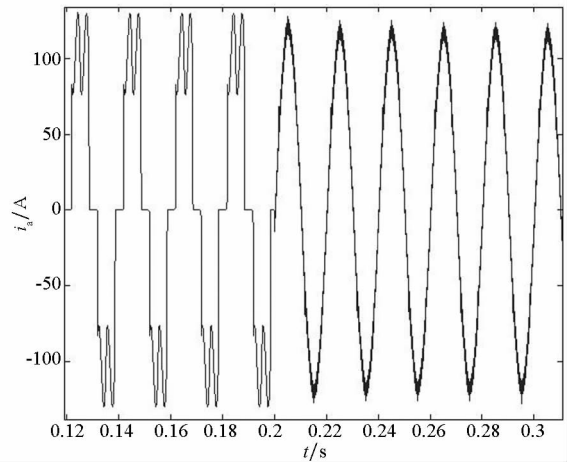


图 13 APF 谐波电流抑制仿真

Fig.13 Simulation of APF harmonic current suppression

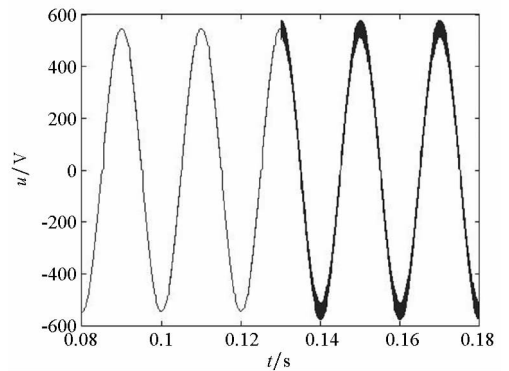


图 14 APF 谐波电压抑制仿真

Fig.14 Simulation of APF harmonic voltage suppression

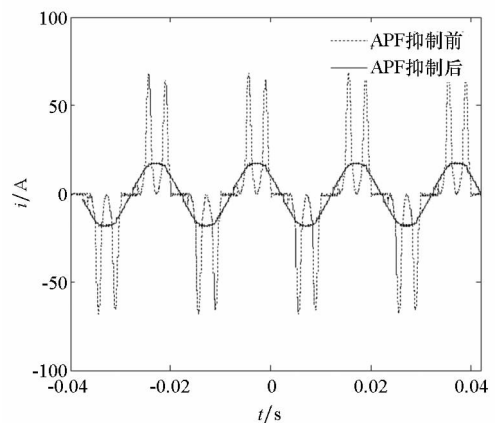


图 15 APF 谐波抑制前后对比波形

Fig.15 Comparison before and after APF harmonic suppression

由图 15 可知, 波形由畸变严重的双波头变成了正弦波, 总谐波畸变电流由 46.7% 降为 4.09%, 有效地抑制了充电谐波, 满足国家标准 5% 的要求。

## 5 结论

对于电磁发射蓄电池充电谐波问题,本文提出多模式模糊滞环控制方法。在不影响系统电网输出时,提高了谐波抑制在电磁发射系统不同模式下的响应效率和稳定性,避免了滞环控制固有的开关频率波动大和传统有源滤波复杂高精度的实时检测调节,减小了有源滤波器在跟踪调节过程中发生谐振事故的风险。结合电磁发射蓄电池充电的特点,多模式控制谐波抑制方法能够取得较好的谐波抑制效果,具有一定的指导意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.  
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] 骆鹤松, 骆水莲. 电力系统谐波研究综述[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011(5): 64-67.  
LUO Hesong, LUO Shuilian. The over view of study on harmonics in electric power system [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2011(5): 64-67. (in Chinese)
- [3] 刘刚, 孙庆文, 肖烨然. 永磁同步电机用坐标变换的电流谐波抑制方法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(5): 30-36.  
LIU Gang, SUN Qingwen, XIAO Yeran. Permanent magnet synchronous motor current harmonics suppression based on coordinate transformation[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(5): 30-36. (in Chinese)
- [4] 姚骏, 夏先锋, 陈西寅, 等. 风电并网用全功率变流器谐波电流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 17-25.  
YAO Jun, XIA Xianfeng, CHEN Xiying, et al. Harmonic currents suppression for full size power grid-connection converter used for wind power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 17-25. (in Chinese)
- [5] Jain S K, Agrawal P, Gupta H O. Fuzzy logic controlled shunt active power filter for power quality improvement[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2002, 149(5): 317-328.
- [6] Kojabadi H M, Yu B, Gadoura I A, et al. A novel DSP-based current controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 985-993.
- [7] Zaky M S, Metwally M K. A performance investigation of a four-switch three-phase inverter-fed IM drives at low speeds using fuzzy logic and PI controllers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3741-3753.
- [8] Panda A K, Patel R. Adaptive hysteresis and fuzzy logic controlled-based shunt active power filter resistant to shoot-through phenomenon [J]. IET Power Electronics, 2015, 8(10): 1963-1977.
- [9] Alam M J E, Muttaqi K M, Sutanto D. A multi-mode control strategy for VAr Support by solar PV inverters in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1316-1326.
- [10] Zhu Z M, Li Y Y. A floating buck controlled multi-mode dimmable LED driver using a stacked NMOS switch [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2015, 62(10): 2584-2593.