

DOI: 10.7667/PSPC161395

# 三相四线制有源电力滤波器多目标优化预测控制策略研究

赵国生, 赵丹

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对传统基于 3D-SVPWM 调制的矢量控制策略对谐波信号跟踪动态效果差和控制目标单一的问题, 在三相四线制不对称负载系统中, 提出了一种多目标优化模型预测控制策略。建立四桥臂有源电力滤波器(FAPF)基于  $\alpha\beta\gamma$  坐标系的离散化数学模型, 实现自然解耦控制。对预测电流做两步预测, 实现对其延时效应的补偿。设置电流跟踪偏差和开关频率为目标函数, 量化控制目标, 预先评估各开关状态的控制效果, 根据评估结果决定变流器的开关状态, 省去了 PWM 调制环节。讨论了采样频率和加权系数两个系统参数对开关频率和电流畸变率的影响。仿真结果表明, 所提策略谐波电流跟踪性能良好, 可有效降低开关频率。

**关键词:** 有源电力滤波器; 三相四线制; 多目标优化; 模型预测控制; 跟踪偏差; 开关频率

## Research on multi-objective optimal predictive control strategy for three-phase four-wire active power filter

ZHAO Guosheng, ZHAO Dan

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor tracking dynamic performance of harmonic signal and single control target in the traditional vector control strategy modulated by 3D-SVPWM, a predictive control strategy of multi-objective optimization model is proposed in the three-phase four-wire asymmetric load system. The discrete mathematical model of four-arm active power filter (FAPF) based on the  $\alpha\beta\gamma$  coordinate system is established to realize natural decoupling control. Two-step prediction of the predicted current is performed to compensate for the delay effect. The current tracking bias and switching frequency is set as the objective function, and the control objectives and the control effect pre-assessment of the switch state are quantified. The switching state of the converter is determined by the evaluation results and the PWM modulation is omitted. The influence of sampling frequency and weight coefficient on switching frequency and current distortion is discussed. The simulation results show that the proposed strategy harmonic current has good tracking performance and can effectively reduce the switching frequency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307152) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5217F0140047).

**Key words:** active power filter; three-phase four-wire; multi-objective optimization; model predictive control; tracking error; switch frequency

## 0 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 以 PWM 变换器作为主要拓扑的电力装置被广泛应用于电力系统中, 因此带来的谐波等电能质量问题日益突出<sup>[1-3]</sup>。在三相四线制系统中, 由于中性线的存在, 往往还有着三相不平衡问题, 给用户用电安全及电网可靠运行带来了巨大威胁<sup>[4-6]</sup>。三相四线制有源电力滤波

器(APF)以其补偿效率高、动态响应时间短及补偿特性不受网侧影响等优点得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

三相四线制APF的拓扑结构主要分为三桥臂电容分裂式(SCAPF)和四桥臂式(FAPF)。由于FAPF比SCAPF多了一个桥臂, 因此其控制自由度更高, 本文针对FAPF进行研究。FAPF传统控制方案为基于3D-SVPWM调制的矢量控制, 电流控制器如采用多PI控制<sup>[9]</sup>、谐振控制<sup>[10]</sup>及重复控制<sup>[11]</sup>可实现准无静差跟踪效果, 该控制方案属于连续时域的控制范畴, 存在着参数整定困难、动态效果不佳及控制目标单一的缺点<sup>[12]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51307152); 国家电网公司科技项目资助(5217F0140047)

随着数字信号处理器(DSP)性能不断提升,基于离散模型的预测控制也开始得到广泛研究<sup>[13-14]</sup>。最早提出的预测控制策略为无差拍控制,该控制方法根据历史周期的电流状态量并采用合适的预测手段去逼近下一时刻的电流值,但是经该控制器得到的输出量为预测电压量,仍然需要与调制环节配合才能得到触发脉冲<sup>[15-16]</sup>。模型预测电流控制(MPCC)是一种新型的控制策略,它根据所采样的电压、电流信号来预测各开关状态作用下的系统响应,量化控制目标,预先评估各开关状态的控制效果,根据评估结果决定变流器的开关状态,将电流环控制和变流器的PWM调制融合为一体<sup>[17]</sup>,控制结构由此得到了简化。

目前,MPCC已在PWM整流器<sup>[18]</sup>、感应电机控制<sup>[19]</sup>、链式变流器<sup>[20]</sup>及并网逆变器<sup>[21]</sup>等场合得到广泛应用。本文将MPCC应用FAPF的控制中,研究其采样频率、开关频率及补偿效果之间的关系。同时,为在满足跟踪性能的基础上降低四桥臂变流器的开关频率,控制目标中引入约束开关频率项,实现FAPF考虑跟踪性能和开关频率指标的有机统一。最后进行对比仿真分析,验证了本文所提方法的优越性。

## 1 FAPF 的数学模型

图1为FAPF的主电路变流器拓扑结构图。Load为二极管整流器带阻感负载; $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 为电网理想三相电压源; $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 、 $i_n$ 为FAPF发出的补偿电流; $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 、 $u_n$ 为变流器交流侧出口电压; $U_{dc}$ 为直流母线电压; $L$ 为交流侧电感; $R$ 为交流侧等效电阻。

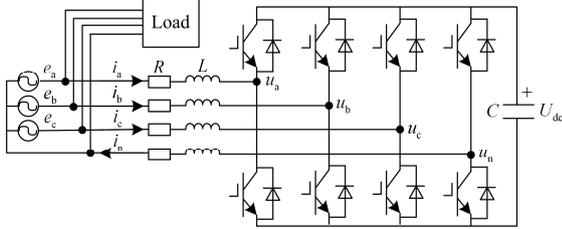


图1 FAPF变流器拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of FAPF converter

根据KVL定律可由图1得到FAPF在坐标系下的数学模型为<sup>[22]</sup>

$$\begin{cases} L\left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_n}{dt}\right) = e_a - R(i_a + i_n) - u_{an} \\ L\left(\frac{di_b}{dt} + \frac{di_n}{dt}\right) = e_b - R(i_b + i_n) - u_{bn} \\ L\left(\frac{di_c}{dt} + \frac{di_n}{dt}\right) = e_c - R(i_c + i_n) - u_{cn} \\ i_n = i_a + i_b + i_c \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,变流器的各相关于中线电流和开关函数间存在强耦合关系。为利于控制器的分相解耦控制<sup>[23]</sup>,需进行一次坐标变换。从abc三相静止坐标系变换至 $\alpha\beta\gamma$ 坐标系的变换矩阵 $T_{abc-\alpha\beta\gamma}$ 为

$$T_{abc-\alpha\beta\gamma} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

则可以得到电流间自然解耦的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = e_\alpha - Ri_\alpha - u_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = e_\beta - Ri_\beta - u_\beta \\ 4L \frac{di_\gamma}{dt} = e_\gamma - 4Ri_\gamma - u_\gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中: $e_\alpha$ 、 $e_\beta$ 、 $e_\gamma$ 为电网理想电压源的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 轴分量; $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 、 $i_\gamma$ 为补偿电流的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 轴的分量; $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ 、 $u_\gamma$ 为变流器交流侧出口电压的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 轴的分量。

## 2 MPCC 策略的基本原理

MPCC是一种基于在线寻优原理的控制方式,它根据系统离散模型对下一时刻最优的输出进行预测,其基本原理如图2所示。其工作流程为:在 $t(k)$ 时刻由谐波电流检测环节得到给定电流 $i^*(k)$ ;对于FAPF来说,其控制系统存在着16种控制状态,MPCC结合系统的离散数学模型和采集的状态量对 $t(k+1)$ 时刻16种控制状态的输出进行预测,得到 $i_1(k+1) \sim i_{16}(k+1)$ ;由图2可知,在16个输出中, $i_2(k+1)$ 与给定 $i^*$ 最为接近,即 $i_2(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻的最优输出,因此,选择 $i_2(k+1)$ 所对应的控制状态在 $k+1$ 时刻将被应用。

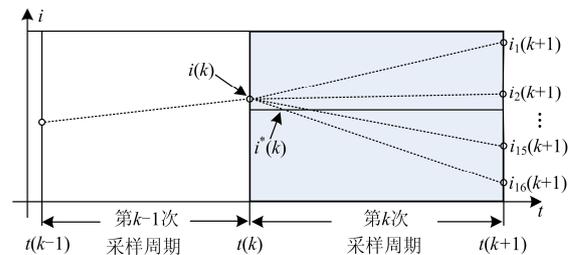


图2 MPCC基本原理图

Fig. 2 Basic schematic diagram of MPCC

传统的矢量控制策略的着力点在于提升控制系统的稳态和动态性能,但是随着控制要求的不断细化,电气领域的控制目标越来越多<sup>[24]</sup>。以电力变流

器为例, 其控制的最终要求往往是跟踪误差、动态响应速度、开关频率及开关损耗等多个目标的集合, 对于该类控制需求, 可视作多目标优化控制问题, 需结合变流器有限开关状态的特性, 采用MPCC策略进行在线全局的滚动优化, 以得到控制的最优效果。而MPCC可方便构建多控制目标的特点, 使得将其应用于FAPF进行优化控制具有很高的自由度。

### 3 FAPF 的多目标优化 MPCC 策略

#### 3.1 电流预测

FAPF的MPCC策略是基于变流器的离散数学模型来实现的。设FAPF系统的采样周期 $T_s$ 为足够小, 则式(3)中的微分项可表示为

$$\frac{di_{\alpha,\beta,\gamma}}{dt} \approx \frac{i_{\alpha,\beta,\gamma}(k+1) - i_{\alpha,\beta,\gamma}(k)}{T_s} \quad (4)$$

式中:  $i_{\alpha,\beta,\gamma}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻系统补偿电流预测值;  $i_{\alpha,\beta,\gamma}(k)$ 为 $k$ 时刻谐波给定电流采样值。下文中的 $e_{\alpha,\beta,\gamma}(k)$ 和 $u_{\alpha,\beta,\gamma}(k)$ 均采用该方式进行瞬时值的描述。

将式(4)代入式(3)可将FAPF的数学模型离散化, 根据无差拍模型, 可以得到 $k+1$ 时刻系统补偿电流预测值为

$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+1) = i_{\alpha}(k) + \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k) - u_{\alpha}(k) - Ri_{\alpha}(k)] \\ i_{\beta}(k+1) = i_{\beta}(k) + \frac{T_s}{L} [e_{\beta}(k) - u_{\beta}(k) - Ri_{\beta}(k)] \\ i_{\gamma}(k+1) = i_{\gamma}(k) + \frac{T_s}{4L} [e_{\gamma}(k) - u_{\gamma}(k) - 4Ri_{\gamma}(k)] \end{cases} \quad (5)$$

#### 3.2 延时补偿

在理想的DSP数字控制系统中, AD采样应该与开关管的触发脉冲时序同步, 但由于MPCC策略利用变流器开关状态的有限性来计算预测模型和滚动优化, 因此, 每一控制周期初始将带来图3所示的系统延时作用, 这将给FAPF控制性能带来影响<sup>[25]</sup>。

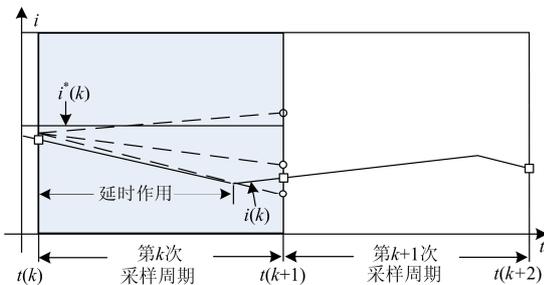


图3 MPCC控制系统的延时影响

Fig. 3 Delay effect of MPCC control system

为克服MPCC系统运行时延时带来的影响, 于 $k$ 时刻对式(5)做两次预测, 具体实现为: 第一次预测

过程由式(5)来完成, 求得 $i_{\alpha,\beta,\gamma}(k+1)$ , 第二次预测过程将 $i_{\alpha,\beta,\gamma}(k+1)$ 向前推算一拍, 可得到两次预测值 $i_{\alpha,\beta,\gamma}(k+2)$ 如式(6)所示。

$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+2) = i_{\alpha}(k+1) + \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k+1) - u_{\alpha}(k+1) - Ri_{\alpha}(k+1)] \\ i_{\beta}(k+2) = i_{\beta}(k+1) + \frac{T_s}{L} [e_{\beta}(k+1) - u_{\beta}(k+1) - Ri_{\beta}(k+1)] \\ i_{\gamma}(k+2) = i_{\gamma}(k+1) + \frac{T_s}{4L} [e_{\gamma}(k+1) - u_{\gamma}(k+1) - 4Ri_{\gamma}(k+1)] \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $e_{\alpha,\beta,\gamma}(k+1) \approx e_{\alpha,\beta,\gamma}(k)$ 。

#### 3.3 多目标优化控制

为了对16个开关状态所对应的预测电流值进行评估, 需通过滚动优化进行在线寻优, 评价指标是使得目标函数为最小。目标函数可先定义为电流跟踪的偏差, 即使得目标函数 $J_i$ 为

$$J_i = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+2)|^2 + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+2)|^2 + |i_{\gamma}^*(k+1) - i_{\gamma}(k+2)|^2 \quad (7)$$

式中,  $i_{\alpha,\beta,\gamma}^*(k+1)$ 为谐波电流给定信号在 $k$ 时刻的预测值, 其计算方式由式(8)给出。

$$i_{\alpha}^*(k+1) = 4i_{\alpha}^*(k) - 6i_{\alpha}^*(k-1) + 4i_{\alpha}^*(k-2) - i_{\alpha}^*(k-3) \quad (8)$$

MPCC策略下的FAPF其开关频率不固定, 如在进行滚动优化时采用式(7)所示的目标函数 $J_i$ , 其最优输出结果仅为谐波电流跟踪效果最佳, 而开关纹波的抑制问题没有得到考虑。为降低开关频率, 本文在FAPF的目标函数中引入约束开关频率项 $n$ 为

$$n = |S_a(k+1) - S_a(k)| + |S_b(k+1) - S_b(k)| + |S_c(k+1) - S_c(k)| + |S_n(k+1) - S_n(k)| \quad (9)$$

式中:  $S_{a,b,c,n}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻所评估的开关状态(其值为“0”或“1”);  $S_{a,b,c,n}(k)$ 为 $k$ 时刻所采集的开关状态(其值为“0”或“1”)。

将跟踪偏差和开关频率两个控制目标经加权求和的方式转换成在线全局优化控制目标 $J$ 为

$$J = J_i + k_{\text{switch}} n \quad (10)$$

式中,  $k_{\text{switch}}$ 为加权系数, 可调节约束开关频率项 $n$ 在总体控制目标的比重, 该值可经试凑得到。

多目标优化控制的MPCC控制流程如图4所示。在完成目标函数 $J$ 构建以后, MPCC经过滚动优化, 将使得 $J$ 最小的 $i_{\text{op}}$ 开关状态作为下一时刻变流器的开关状态。

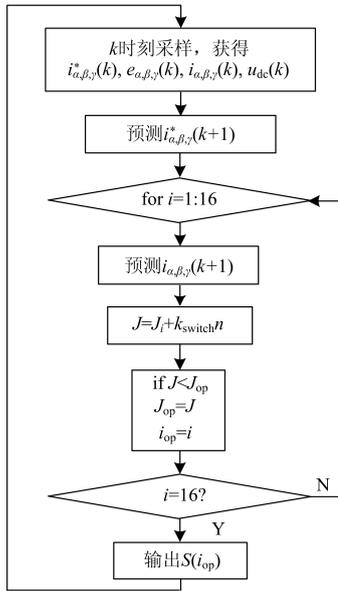


图 4 多目标优化MPCC控制流程图

Fig. 4 Control flow chart of multi-objective optimal MPCC

#### 4 仿真分析

基于MPCC的FAPF离散数学模型和控制策略，在Matlab/Simulink仿真软件中搭建仿真模型进行验证，系统仿真参数见表1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
电网电压有效值 $e_{abc}/V$	220
频率 $f/Hz$	50
交流侧电感 $L/mH$	3
交流侧等效电阻 $R/\Omega$	0.1
直流母线电容 $C/\mu F$	2200
直流母线电压 $U_{dc}/V$	800
负载电阻 $R_l/\Omega$	15
负载电感 $L_l/mH$	4
不平衡电阻 $R_w/\Omega$	8

在表1的主电路仿真参数下，得到非线性谐波源补偿前电流波形如图5所示。可以看出，电流畸变率不满足要求(低于5%)，中线电流幅值较高。

##### 4.1 采样频率 $f_c$ 与开关频率 $f_{switch}$ 、THD 的关系

采样频率  $f_c$  是MPCC策略一个至关重要的参数，不同的采样频率将对FAPF开关器件的动作频率  $f_{switch}$  和THD产生影响。

$f_c$  分别设定为 5 kHz和 40 kHz频率下，经MPCC补偿后电流波形如图6所示。可以直观地看出，40 kHz的采样频率明显比 5 kHz得到的电流波形品质更好，畸变率更低，但其开关纹波较多。

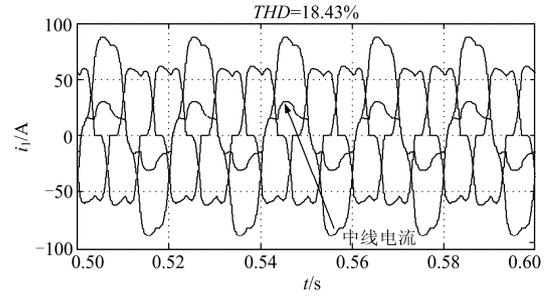
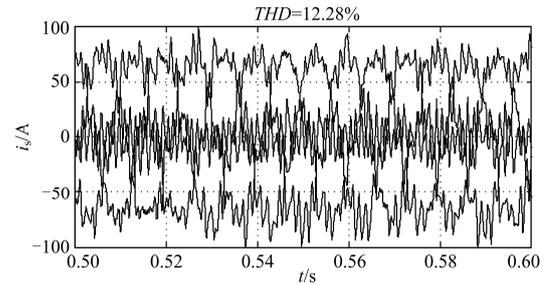
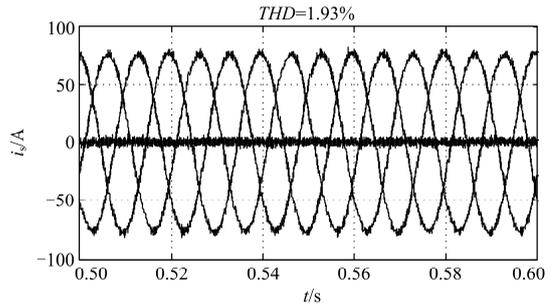


图 5 补偿前电流波形

Fig. 5 Current waveform before compensation



(a)  $f_c=5$  kHz



(b)  $f_c=40$  kHz

图 6 不同采样频率下的系统电流波形

Fig. 6 System current waveform with different sampling frequency

为确定最优的采样频率，可归纳采样频率  $f_c$  (5~40 kHz) 与开关频率  $f_{switch}$ 、THD的关系如图7所示。可以看出，随着  $f_c$  的增加，系统电流的THD值降低(近似成负相关的关系)，补偿后电流品质变好，而  $f_{switch}$  值却上升(近似成正相关的关系)，开关工作次数增加，损耗增大。兼顾  $f_{switch}$  和THD两个指标，可确定MPCC的最优  $f_c$  为 20 kHz。

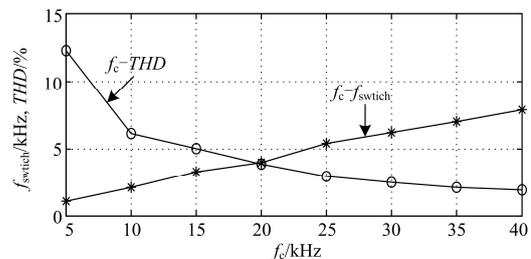


图 7  $f_c$  与  $f_{switch}$ 、THD 的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between  $f_c$ ,  $f_{switch}$  and THD

#### 4.2 加权系数 $k_{\text{switch}}$ 与开关频率 $f_{\text{switch}}$ 、THD 的关系

加权系数  $k_{\text{switch}}$  的试凑是多目标MPCC实现的重要一环, 可根据控制需求来对该值进行动态调节。本文确定电流跟踪偏差为主要控制目标, 同时考虑次要控制目标为  $f_{\text{switch}}$ , 实现电流控制精度和开关损耗的在线全局优化控制。

为实现电流控制精度和开关损耗的全局最优, 在  $f_c=40$  kHz条件下, 可归纳  $k_{\text{switch}}$  与开关频率  $f_{\text{switch}}$ 、THD的关系如图 8 所示。可以看出, 随着  $k_{\text{switch}}$  增大, 约束开关频率目标在改进MPCC的控制优先级变高, 因此  $f_{\text{switch}}$  随之下降, 而电流跟踪偏差目标优先级有所降低, 因此其对应的THD随之上升, 由此验证了所研究多目标优化MPCC策略的正确性。兼顾  $f_{\text{switch}}$  和THD两个指标, 可确定多目标MPCC的最优  $k_{\text{switch}}$  为 1.1。

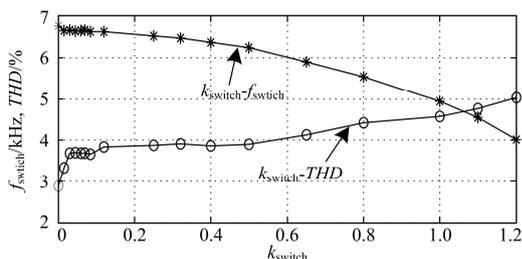


图 8  $k_{\text{switch}}$  与  $f_{\text{switch}}$ 、THD 的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between  $k_{\text{switch}}$ ,  $f_{\text{switch}}$  and THD

#### 4.3 多目标 MPCC 与矢量控制对比

为观察多目标MPCC对阶跃负载的动态响应能力, 在 1 s 时刻进行加载, 图 9 为多目标MPCC策略和基于PI+3DSVPWM矢量控制策略的电流对比波形。可以看出, 多目标MPCC策略的电流跟踪精度比矢量控制策略稍差一些, 但在负载跳变后, 基于

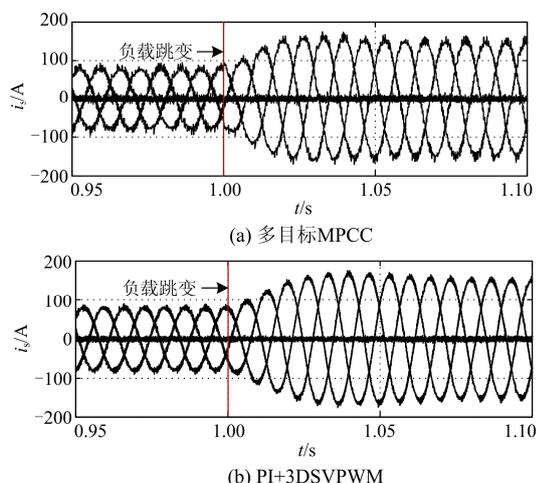


图 9 两种策略的电流对比波形

Fig. 9 Current waveform of two strategies

多目标 MPCC 的电流可在两个基波周期内实现稳定, 而矢量控制至少需 3 个基波周期才可实现稳定, 由此验证了多目标 MPCC 在动态性能方面的优越性。

## 5 结论

本文提出了一种FAPF的多目标优化模型预测控制策略。该控制策略基于FAPF离散化数学模型, 预先评估各开关状态的控制效果, 根据评估结果决定变流器的开关状态, 并采用两次预测的方式对系统延时进行补偿。通过构建电流跟踪偏差和开关频率目标函数, 实现系统多目标优化控制。对比矢量控制, 本文所提策略具有控制结构简单、控制目标可选、动态响应速度快和静态性能好等优点。今后的研究重点是在同一采样周期内, 插入多个虚拟电压矢量, 进一步提高模型控制算法的电流跟踪精度, 以抵消预测模型的误差。

## 参考文献

- [1] 吕广强, 刘娉, 段海军. APF 中一种改进的变步长 LMS 自适应谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 96-101.  
LÜ Guangqiang, LIU Yu, DUAN Haijun. An improved variable step-size LMS adaptive harmonic detection algorithm for active power filters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 96-101.
- [2] 李鹏, 蒋晓明, 黄俊华, 等. 并联型 APF 补偿容性非线性负载不稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 12-22.  
LI Peng, JIANG Xiaoming, HUANG Junhua, et al. Instability mechanism study of shunt active filter in compensation of capacitive nonlinearity load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 12-22.
- [3] 武敏, 孟润泉, 赵刚. 三电平并联型 APF 死区效应分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 34-55.  
WU Min, MENG Runquan, ZHAO Gang. Tri-level shunt APF dead-time effect analysis and its countermeasure research[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 34-55.
- [4] 何正友. 分布式新能源接入电网的谐波热点问题探讨[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 12-20.  
HE Zhengyou. Discussion on harmonic hot issues of distributed new energy connected to power grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 12-20.
- [5] LI Z M, LI W W, PAN T H. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-010-0018-9
- [6] 金金, 姚钢, 周荔丹, 等. 电容分裂式三相四线制 APF 新型控制方法[J]. 电力电子技术, 2016, 50(5): 53-57.  
JIN Jin, YAO Gang, ZHOU Lidan, et al. New control method for split-capacitor-type three-phase four-wire

- APF[J]. *Power Electronics*, 2016, 50(5): 53-57.
- [7] 周雪松, 刘伟, 马幼捷, 等. 基于 LADRC 的三相四线制并联型有源电力滤波器系统分析[J]. *高电压技术*, 2016, 45(4): 1290-1299.  
ZHOU Xuesong, LIU Wei, MA Youjie, et al. Analysis of three-phase four-wire shunt active power filter system based on LADRC[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 45(4): 1290-1299.
- [8] 陈磊, 胡晓菁, 史红辉. 配变三相不平衡解决方案及控制策略[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 30(3): 33-39.  
CHEN Lei, HU Xiaojing, SHI Honghui. Solution and control strategy of three-phase unbalance in distribution transformer[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2016, 30(3): 33-39.
- [9] 史林军, 唐国庆, 张磊. 飞轮储能系统多 PI 控制器参数优化[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(10): 65-69.  
SHI Linjun, TANG Guoqing, ZHANG Lei. Parameter optimization of FESS PI controllers[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(10): 65-69.
- [10] 孙强, 魏克新, 王莎莎, 等. PWM 变换器在矢量旋转坐标系下比例谐振控制策略及其鲁棒性设计[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(5): 1344-1356.  
SUN Qiang, WEI Kexin, WANG Shasha, et al. A novel proportional resonant control strategy and robust design in rotary vector frames for PWM converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(5): 1344-1356.
- [11] 郑诗程, 徐礼萍, 郎佳红, 等. 基于重复 PI 控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. *电工技术学报*, 2016, 44(6): 219-225.  
ZHENG Shicheng, XU Liping, LANG Jiahong, et al. Static var generator based on repetitive PI control and feedforward control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 44(6): 219-225.
- [12] 郭洪月, 关微, 赵波, 等. 基于改进型 SVPWM 的 SAPF 研究[J]. *电气传动*, 2016, 22(5): 57-60.  
GUO Hongyue, GUAN Wei, ZHAO Bo, et al. Research of SAPF based on improved SVPWM[J]. *Electric Drive*, 2016, 22(5): 57-60.
- [13] LIN C K, YU J T, LAI Y S, et al. Improved model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 223-233.
- [14] HE J, LI Y W, LIANG X, et al. Deadbeat weighted average current control with corrective feed-forward compensation for microgrid converters with non-standard LCL filter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 35(5): 156-167.
- [15] 程飞, 夏伟, 武松林, 等. 一种用于 SVG 的无差拍控制算法[J]. *电气传动*, 2016, 46(04): 60-64.  
CHENG Fei, XIA Wei, WU Songlin, et al. New control algorithm for SVG based on dead-beat scheme[J]. *Electric Drive*, 2016, 46(04): 60-64.
- [16] HAN Y, SHEN P, ZHAO X, et al. An enhanced power sharing scheme for voltage unbalance and harmonics compensation in an islanded microgrid[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 55(12): 34-44.
- [17] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 55(12): 4312-4324.
- [18] 马宏伟, 李永东, 郑泽东, 等. 电流环模型预测控制在 PWM 整流器中的应用[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(8): 136-141.  
MA Hongwei, LI Yongdong, ZHENG Zedong, et al. PWM rectifier using a model predictive control method in the current loop[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(8): 136-141.
- [19] NAEEM M A, HASAN K M. Direct torque control (DTC) of three phase induction motor using model based predictive control (MPC) scheme deploying Branch and bound algorithm[C] // *International Conference on Renewable Energy Research and Applications: IEEE*, 2013, 23(7): 990-995.
- [20] RODRIGUEZ J, BERNET S, WU B, et al. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 54(6): 2930-2945.
- [21] 王印松, 王姝媛. 三相并网逆变器输出电流多步预测控制[J]. *智能电网*, 2015, 3(3): 34-42.  
WANG Yinsong, WANG Shuyuan. Multi-step predictive control for output current of three-phase grid-connected inverters[J]. *Smart Grid*, 2015, 3(3): 34-42.
- [22] 王实, 王群京, 漆星, 等. 四桥臂 APF 电流跟踪控制方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(12): 1162-1169.  
WANG Shi, WANG Qunjing, QI Xing, et al. Research on current tracking control method for four-leg APF[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(12): 1162-1169.
- [23] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [24] PANTEN N, HOFFMANN N, FUCHS F W. Finite control set model predictive current control for grid-connected voltage-source converters with LCL filters: a study based on different state feedbacks[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(7): 5189-5200.
- [25] CORTES P, RODRIGUEZ J, SILVA C, et al. Delay compensation in model predictive current control of a three-phase inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1323-1325.

收稿日期: 2016-08-28; 修回日期: 2016-12-07

作者简介:

赵国生(1965—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量;

赵丹(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制与分析。E-mail: 340654733@qq.com

(编辑 周金梅)