

# 面向低功耗的 APF 模型预测控制策略研究

陈勇 同向前

西安理工大学电气工程学院 西安 710048

## Study on Model Predictive Control Strategy of APF for Low Power Loss

CHEN Yong TONG Xiangqian

School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China

**摘要** 针对现阶段的有源电力滤波器普遍存在自身损耗大、散热困难等问题,本文提出一种多目标的模型预测电压控制方法以实现降低有源电力滤波器损耗的目的。建立了三相四桥臂有源电力滤波器的  $\alpha\beta\gamma$  坐标系离散化数学模型,对经典模型预测控制的电流预测模型进行优化得到电压预测模型,可有效缩短模型预测算法的滚动优化计算时间。建立了电压跟踪偏差最小和开关切换次数最少为目标的标幺化阀函数,并按照总损耗与权重系数的实测关系曲线选择最优加权系数。搭建了仿真模型和实验平台,验证了多目标模型预测电压控制策略降低损耗的有效性。

**关键字:** 有源电力滤波器;模型预测控制;低功耗

**ABSTRACT** In view of the problems of high loss and heat dissipation of Active Power Filter (APF) at present, a multi-objective model predictive voltage control method is proposed to reduce the loss of APF. The discrete mathematical model in the  $\alpha\beta\gamma$  coordinate system of three-phase four-leg APF is established, a voltage prediction model is obtained by optimizing the classical current prediction model, which can effectively shorten the rolling optimization calculation time of the model prediction algorithm. The unitary cost function with the minimum voltage tracking deviation and the minimum switching times is established, and the optimal weighting coefficient is selected according to the measured relationship curve between total loss and weighting coefficient. The simulation model and experimental platform are built to verify the effectiveness of multi-objective model predictive voltage control strategy in reducing power loss.

**KEY WORD:** APF; Model predictive control; Low power loss

## 1 绪论

随着用电设备的电力电子化,电网的谐波污染问题日益严重。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)作为治理谐波污染和改善电网电能质量的有效手段,近十年来取得了长足的进步,并在中低压配电网中得到了广泛的应用。随着国家能源双碳战略目标的确定和对节能减排的大力推动,APF的运行效率成为衡量 APF 性能优劣的一个重要指标<sup>[1]</sup>。

国内外在如何提高 APF 效率方面已经展开了先期研究。文献[2]在模型预测控制的基础上,加入单极性调制思想和滞环控制思想来降低开关频率,从而降低 APF 的开关损耗;文献[3]在价值函数中增加了开关动作次数作为次要控制目标,通过调节加权系数进而减少开关动作次数,实现开关损耗的降低;文献[4]针对 APF 开关损耗大,提出了一种将电压空间矢量控制与滞环跟踪控制相结合的方法,加快了电

流跟踪速度,有效减少了逆变器的开关次数,降低了开关损耗;文献[5]针对三电平 APF 的电流环控制,提出一种双滞环空间矢量控制算,将减少开关动作次数和电流跟踪误差做为目标,通过判断误差电流矢量幅值的大小,使用双滞环控制方法对开关频率进行优化,实现降低开关损耗的目的。

上述方法都在一定程度上改善了 APF 的效率,但是也会带来一些不利的问题,譬如影响装置的补偿性能和运行平稳性等。本文围绕 APF 的降损问题,主要从控制策略方面研究 APF 的运行损耗,利用 PLECS 实时仿真和实验平台对本文所提算法进行验证,结果表明所提控制算法的正确性和有效性。

## 2 并网逆变器数学模型

APF 采用三相四桥臂拓扑,如图 1 所示。图中  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为三相电源电压,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 、 $i_n$  分别为 APF 的三相补偿电流及中线补偿电流,

$u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 、 $u_n$  分别表示四桥臂换流器的输出电压， $u_{dc}$  为直流侧电容电压， $L$  为交流侧输出滤波电感，其等效电阻为  $R$ ，直流侧稳压电容为  $C$ ，开关器件  $T_1$ - $T_8$  采用 SiC MOSFET [6]。

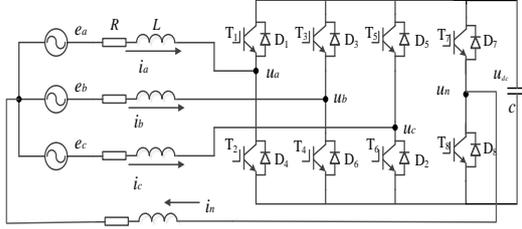


图 1 三相四桥臂 APF 原理电路

Fig.1 Three-phase four-leg APF principle circuit

逆变器工作状态由四个桥臂开关  $S_i$  控制，定义开关状态如下：

$$S_i = \begin{cases} 1; & \text{上桥臂开通, 下桥臂关断} \\ 0; & \text{下桥臂开通, 上桥臂关断} \end{cases} \quad (i = a, b, c, n) \quad (1)$$

对图 1 所示电路列写 KCL 方程, 可得 APF 在 abc 坐标系下的数学模型：

$$\begin{cases} L \left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_n}{dt} \right) = e_a - R(i_a + i_n) - u_{an} \\ L \left( \frac{di_b}{dt} + \frac{di_n}{dt} \right) = e_b - R(i_b + i_n) - u_{bn} \\ L \left( \frac{di_c}{dt} + \frac{di_n}{dt} \right) = e_c - R(i_c + i_n) - u_{cn} \\ i_n = i_a + i_b + i_c \end{cases} \quad (2)$$

由式 (2) 可知，三相电流存在强耦合关系，因此对其进行解耦变换，可得到  $\alpha\beta\gamma$  坐标系下数学模型：

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

对式 (3) 中的微分项用前向差分进行离散化：

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (4)$$

可得离散化的逆变器数学模型：

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

上式表明，根据  $k$  时刻并网电流、电网电压采样值可以预测出  $k+1$  时刻的电流值。

### 3 模型预测控制策略及其改进

#### 3.1 模型预测控制原理

模型预测控制分为以下四个步骤：预测模型、参考轨迹、滚动优化和反馈校正。首先建立系统动态模型，测量当前状态量，然后再预测下一时刻的状态量，为了对下一时刻的状态进行选择，应构造一个目标函数，当目标函数的值最小时，此时的状态最优，选择最优的电压矢量，与此电压矢量对应的开关状态作用于逆变器以实现电流最优跟踪控制。

定义模型预测控制的目标函数如下：

$$J = [i_\alpha^*(k+1) - i_\alpha(k+1)]^2 + [i_\beta^*(k+1) - i_\beta(k+1)]^2 + [i_\gamma^*(k+1) - i_\gamma(k+1)]^2 \quad (6)$$

变流器的控制矢量是有限的，在每一控制矢量作用下可以预测得到下一时刻 APF 的输出电流并计算目标函数值，则最小的目标函数值所对应的控制矢量就是最优矢量。图 2 给出了模型预测控制的矢量选择过程，通过目标函数的优化来选择最优开关状态 [7-10]。

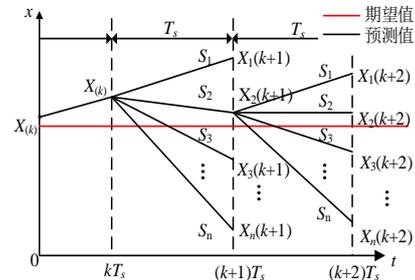


图 2 模型预测控制原理图

Fig.2 Schematic diagram of model predictive control

#### 3.2 改进的模型预测控制策略

##### 3.2.1 电压预测模型

在三相四桥臂变流器中，共有 16 种开关状

态, 在滚动优化时, 需要对电流预测模型和目标函数分别进行 16 次计算, 计算量相对较大, 控制算法执行时间长, 将影响 APF 的采样周期和补偿精度。

为此, 可对式(5)所示电流值的预测表达式进行优化改进, 得出理想电压矢量的表达式:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^*(k) = e_{\alpha}(k) - Ri_{\alpha}(k) - \frac{L}{T_s} [i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k)] \\ u_{\beta}^*(k) = e_{\beta}(k) - Ri_{\beta}(k) - \frac{L}{T_s} [i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k)] \\ u_{\gamma}^*(k) = e_{\gamma}(k) - 4Ri_{\gamma}(k) - \frac{4L}{T_s} [i_{\gamma}^*(k+1) - i_{\gamma}(k)] \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7)可以看出, 当电压矢量与理想电压矢量相等时便可以实现输出电流与参考电流的误差值为零。此时, 目标函数等价为:

$$J_1 = \left(\frac{T_s}{L}\right)^2 \{ [u_{\alpha}^*(k) - u_{\alpha}(k)]^2 + [u_{\beta}^*(k) - u_{\beta}(k)]^2 + \frac{1}{16} [u_{\gamma}^*(k) - u_{\gamma}(k)]^2 \} \quad (8)$$

基于式(7)的模型预测称为电压模型预测控制策略, 简称 MPVC 策略。

### 3.2.2 延时补偿

实际控制系统需要一定时间计算才能得出输出开关状态, 因此测量时刻与最优开关矢量之间存在一定的时间间隔, 系统将持续应用上一个开关状态而非最优开关状态。延时分析如图 3 所示。

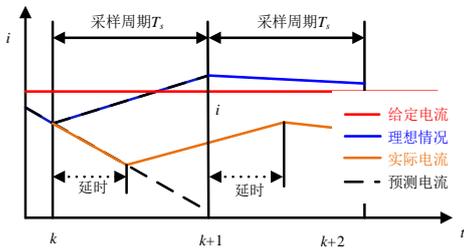


图 3 电流预测控制时延分析

Fig.3 Time delay analysis of current predictive control

为解决延迟带来的问题, 本文将在  $k$  时刻进行两次预测, 具体实现为: 第一次预测过程由式(7)来完成, 求得  $u_{\alpha\beta\gamma}^*(k)$ , 第二次预测过程只需要将  $u_{\alpha\beta\gamma}^*(k)$  向前推算一拍即可, 就能够得到第二次的预测值  $u_{\alpha\beta\gamma}^*(k+1)$ , 如下式所

示。

$$\begin{cases} u_{\alpha}^*(k+1) = e_{\alpha}(k+1) - Ri_{\alpha}(k+1) - \frac{L}{T_s} [i_{\alpha}^*(k+2) - i_{\alpha}(k+1)] \\ u_{\beta}^*(k+1) = e_{\beta}(k+1) - Ri_{\beta}(k+1) - \frac{L}{T_s} [i_{\beta}^*(k+2) - i_{\beta}(k+1)] \\ u_{\gamma}^*(k+1) = e_{\gamma}(k+1) - 4Ri_{\gamma}(k+1) - \frac{4L}{T_s} [i_{\gamma}^*(k+2) - i_{\gamma}(k+1)] \end{cases} \quad (9)$$

## 4 APF 的效率优化

在 MPVC 策略下, APF 的补偿性能并不是随着开关频率的上升而上升, 而是当开关频率达到一定程度后, 补偿性能随着开关频率的上升反而下降, 这样就会造成不必要的开关损耗和电感的磁芯损耗。由于 MPVC 的开关频率并不是固定的, 为了实现 APF 损耗的降低, 可以在下一时刻开关状态最优值选取时尽量减少开关器件的动作, 进而降低开关损耗。

为了找到 APF 的最优开关频率, 本文将 MPVC 在单目标控制的基础上添加开关频率约束附加项  $J_f$ , 实现多目标综合优化控制:

$$J_f = |S_a(k+1) - S_a(k)| + |S_b(k+1) - S_b(k)| + |S_c(k+1) - S_c(k)| + |S_n(k+1) - S_n(k)| \quad (10)$$

此时, 目标函数  $J$  由给定电压偏差的目标函数  $J_1$  和约束开关动作次数的目标函数  $J_f$  共同组成, 通过加权系数  $\lambda$  调节各个控制目标在目标函数中的比重:

$$J = (1-\lambda) J_1 + \lambda J_f \quad (11)$$

在式(11)的目标函数中, 两个性能指标所代表物理意义完全不同, 对两个目标的优先级的定义也并不是非常直观, 这无疑给加权系数的设计带来了困难。为此, 本文对目标函数进行了归一化处理, 这样即简化了加权系数的设计过程, 又使得两个目标函数的优先级更加直观, 这样的设计更利于目标函数普遍化、标准化。

由于 APF 的最大输出电压不可能大于  $u_{dc}$ , 因此本文将  $u_{dc}$  作为以电压偏差为目标函数  $J_1$  的基准值。由式(10)可知相邻时刻的开关状态变化的次数最多为 4 次, 因此本文将其作为  $J_f$  的基准值, 由此得到多目标 MPVC 的最终目标函数  $g$ :

$$g = (1 - \lambda) \frac{J_1}{u_{dc}} + \lambda \frac{J_f}{4} \quad (12)$$

其中加权系数的设计确定了次级控制目标的重要程度,也对系统的稳定性起着重要作用。目前关于怎样才能取到最优  $\lambda$  值并没有明确的理论依据,多数情况下是根据大量仿真或者实验得到。

值得指出,开关频率确实与变流器的开关损耗呈负相关关系,但是考虑到开关器件的导通损耗和滤波电感的铜耗,开关频率与变流器的总损耗或效率并不一定呈单调关系。随着开关频率的进一步降低,不仅网侧电流质量会下降,开关器件的导通损耗和滤波电感的铜损也会有所上升。因此,找到一个合适的开关频率或权重系数  $\lambda$  是实现 APF 补偿精度和效率优化的前提。

本文是采用分支与定界算法,在仿真中引入包括滤波电感的铜耗与铁耗、开关器件的态损耗与开通关断损耗(包括二极管的反向恢复损耗)、直流支撑电容的介质损耗在内的变流器总损耗计算,经过不同权重系数下的多次仿真测试,综合考虑 APF 的补偿效果和总体损耗,选择权重系数  $\lambda$  的最优值。

## 5 仿真和实验验证

本文在仿真软件 PLECS 中搭建仿真模型进行仿真分析,仿真模型中包括主电路、控制部分,其中控制部分采用 DLL 编程实现。设置仿真时长为 20.0s,散热片和器件工作的初始环境温度均设为 25℃;选择基于物理实际的 Cauer 热等效网络进行参数配置。仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 APF 仿真系统参数

Tab.1 Simulation parameters of the APF

参数	值
额定功率	20kVA
电网额定电压	380V
滤波电感	1.2mH
直流电压	800V
直流支撑电容	2200 $\mu$ F
采样周期	10 $\mu$ s

### 5.1 仿真分析

负载为典型的三相整流负载,含有 5 次、7

次等特征谐波,电流总谐波畸变率达到了 24.13%,电流波形及其频谱如图 4 所示。

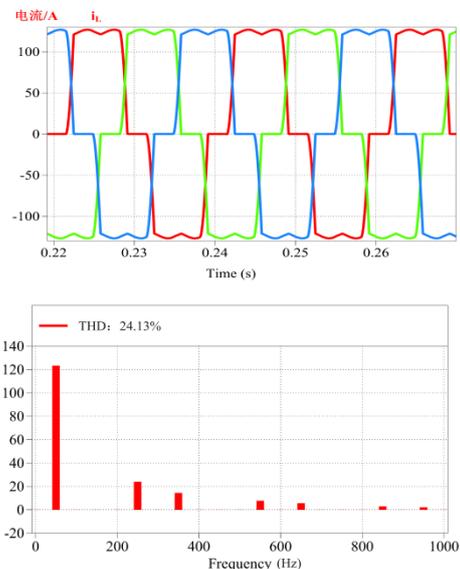


图 4 负载电流及其频谱分析

Fig.4 Load current and its spectrum analysis

#### (1) 单目标 MPVC 策略的仿真分析

图 5 给出了 APF 在单目标 MPVC 策略下的仿真输出结果。补偿后,电流总谐波畸变率 THD=1.85%,谐波补偿效果良好。同时,测量得到:变流器的平均开关频率为 22.73kHz,总损耗为 410.11W。

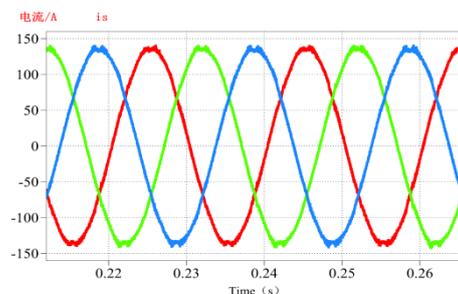


图 5 单目标 MPVC 策略下的网侧电流

Fig.5 Grid current under single objective MPVC strategy

#### (2) 多目标 MPVC 策略的仿真分析

在进行多目标的优化控制时,以开关频率作为辅助控制目标,以降低开关动作的次数。为获得最佳的加权系数  $\lambda$  值,仿真中不断调节加权系数使开关频率所占比重不断上升,直到网侧电流的总谐波畸变率超过 5%,此时达到加权系数的极限值,确定加权系数的取值范围。仿真测试结果如下表所示。

表2 多目标仿真的测试结果

Tab.2 Test results of multi-objective simulation

加权系数	THD(%)	平均开关频率(kHz)	总损耗(W)
0	1.85	22.74	410.11
0.01	1.95	18.13	388.84
0.02	2.08	15.90	380.65
0.03	2.29	14.29	378.83
0.04	2.39	12.95	371.52
0.05	2.54	11.21	368.11
0.06	2.76	10.70	369.06
0.07	2.96	9.75	369.69
0.08	3.09	8.83	372.25
0.09	3.32	8.03	374.43
0.1	3.62	7.28	377.74
0.11	4.03	6.59	383.17
0.12	4.19	6.19	388.4
0.13	4.46	5.68	400.12
0.14	4.92	5.30	407.71

以 APF 的损耗为依据,并结合网侧电流的 THD 寻到加权系数最优值,实现补偿性能和开关损耗的优化控制。由表 2 可得补偿后网侧电流 THD 和 APF 总损耗随权重系数的变化曲线,如图 6 所示。

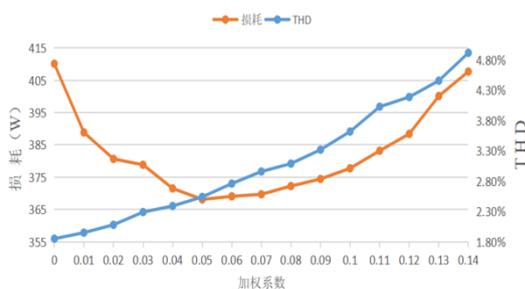


图6 THD、功耗与加权系数的关系曲线

Fig.6 Relationship of weighting coefficient with the THD and power loss of APF

可以看出,随着加权系数  $\lambda$  的不断调整,控制开关频率在多目标 MPVC 中的优先级逐渐变高,开关频率随之下降,电压跟踪偏差目标优先级有所降低,导致 APF 的补偿效果变差,但其损耗会有所下降。由于 THD 需要限制在 5% 以内,由表 2 可得到  $\lambda$  的取值范围为 0-0.14,随着加权系数的增大,THD 逐渐上升,平均开关频率下降,滤波电感的铁损和器件的

开关损耗降低,但是器件的导通损耗和电感铜耗会有所上升,因此系统的损耗先降低后上升。兼顾系统的损耗和 THD 两个指标,确定多目标 MPVC 加权系数最优值为 0.05。

图 7 为最优加权系数下的网侧电流波形及其频谱。可以看出,多目标 MPVC 下补偿后网侧电流的 THD 为 2.54%,比单目标 MPVC 下的 1.85% 高了 0.69%;多目标 MPVC 下平均开关频率约为 11.21kHz,比单目标 MPVC 下的 22.73kHz 大幅度下降一半,多目标 MPVC 下 APF 损耗为 368.11W,与单目标 MPVC 下 410.11W 相比,损耗降低了 10.24%。

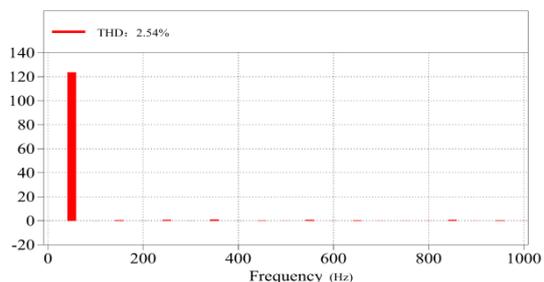
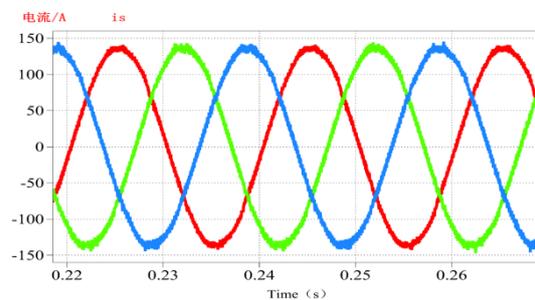


图7 多目标 MPVC 策略下的仿真结果

Fig.7 Simulation results under multi-objective MPVC strategy

## 5.2 实验

为了验证改进后的模型预测控制能够有效降低 APF 的运行损耗,本文搭建 20kVA 的实验平台进行验证。负载为三相二极管整流负载,含有 5 次、7 次等特征谐波,电流总谐波畸变率为 29.7%,电流波形及其频谱如图 8 所示。



- [2]杨兴武, 冀红超等. 基于模型预测控制的并网逆变器开关损耗优化方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 35(08): 84-89.
- [3]尚姝钰, 陈豪等. 基于模型预测控制的有源电力滤波器开关损耗优化设计[J]. 轻工学报, 2017, 32(2): 103-108.
- [4]陈荣, 刘超. APF 电压空间矢量滞环控制方法研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(11), 82-88.
- [5]赵钢, 邵广时. 双滞环空间矢量电流控制的三电平有源滤波器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(04), 132-136.
- [6]J. Huang, B. Yang, F. Guo, et al. "Priority Sorting Approach for Modular Multilevel Converter Based on Simplified Model Predictive Control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 6, pp. 4819-4830, June 2018.
- [7]G. Qi, A. Chen and J. Chen, "Improved control strategy of interlinking converters with synchronous generator characteristic in islanded hybrid AC/DC microgrid," CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 2, no. 2, pp. 149-158, 2017.
- [8]B. Wang, J. Huang, C. Wen, et al. "Event-Triggered Model Predictive Control for Power Converters." IEEE Trans. Ind. Electron., early access.
- [9]J. Huang J, A. Zhang, H. Zhang, et al. "Improved Direct Power Control for Rectifier Based on Fuzzy Sliding Mode," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 22, no. 3, pp.1174-1180, 2014.
- [10] Z. Ma, X. Zhang, J. Huang and B. Zhao, "Stability Constraining Dichotomy Solution Based Model Predictive Control to Improve the Stability of Power Conversion System in the MEA," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 7, pp. 5696-5706, 2019.

**作者简介:**

陈勇(1991-), 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量的分析与控制。(13429775061@163.com)

同向前(1961-), 博士, 教授, 主要研究方向为现代电力电子技术及其在电力系统中的应用。(xqtong@xaut.edu.cn)