

预测重复控制算法研究

赵博涵¹, 谢积锦^{2,3}, 李俊¹, 刘斌¹, 赖俊波¹

- (1. 南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063;
2. 北部湾大学 机械与船舶海洋工程学院, 广西 钦州 535011;
3. 广西海洋工程装备与技术重点实验室, 广西 钦州 535011)

摘要:针对电网电压畸变时有源电力滤波器(APF)系统的鲁棒性下降问题,提出了一种基于预测重复控制的解决方案。首先,建立了弱电网条件下的APF数学模型,并引入重复因子,构建了抑制电网电压畸变的模型。在此基础上,采用预测控制算法计算下一拍的控制向量,并通过修正电流参考的方法,提升了控制器的精度和动态响应速度。该方法从模型层面出发,抑制了电网电压畸变引起的模型参数突变问题,从而增强了预测控制器的鲁棒性。最后,通过仿真和实验验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词:有源电力滤波器;预测重复控制;电网畸变;重复因子;鲁棒性

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26428

Research on Predictive Repetitive Control Algorithms

ZHAO Bohan¹, XIE Jijin^{2,3}, LI Jun¹, LIU Bin¹, LAI Junbo¹

- (1. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;
2. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, Guangxi, China;
3. Guangxi Key Laboratory of Marine Engineering Equipment and Technology, Qinzhou 535011, Guangxi, China)

Abstract: A solution based on predictive repetitive control was proposed to address the problem of reduced robustness in active power filter (APF) systems during grid voltage distortion. Firstly, a mathematical model of APF under weak grid conditions was established, and a repetitive factor was introduced to construct a model for suppressing grid voltage distortion. On this basis, a predictive control algorithm was used to calculate the control vector for the next step, and the accuracy and dynamic response speed of the controller were improved by modifying the current reference method. This method suppresses the sudden change of model parameters caused by grid voltage distortion from the model level, thus enhancing the robustness of the predictive controller. Finally, the effectiveness and practicality of the proposed method were verified through simulation and experiments.

Key words: active power filter (APF); predictive repetitive control; grid distortion; repetitive factor; robustness

电力电子装置的广泛应用使得电网电压和电流易发生非线性畸变,导致谐波污染日趋严重。有源电力滤波器(active power filter, APF)作为一种可动态补偿谐波及无功的电力电子装置,得到了广泛关注和研究。电流控制策略很大程度上决定了APF的补偿效果,常见的电流控制策略有比例积分(PI)控制、准比例谐振控制、重复控制、电压空间矢量控制等。其中,PI控制^[1]易实

现、动态性能好,但其跟踪交流量时存在稳态误差,且带宽受限,易产生高频失真;准比例谐振控制^[2]可以无静差地跟踪交流信号,但APF需要跟踪多种不同次频率的电流信号,因此需要设计多个准比例谐振控制器,这导致控制器设计十分复杂;重复控制^[3]基于内模原理,可实现对周期性重复信号的无静差跟踪,但其存在一个工频周期的延时,动态性能较差;文献[4]提出一种改进空间

基金项目:国家自然科学基金(61963030);自动化教指委教改项目(202137)

作者简介:赵博涵(2000—),男,硕士,主要研究方向为电力电子系统的设计及控制,Email:2073780418@qq.com

通讯作者:谢积锦(1987—),男,硕士,讲师,主要研究方向为电力电子建模与控制技术、新能源发电,Email:xiejijin@163.com

矢量脉宽调制控制策略,在三相静止坐标系下,通过分析不同电压矢量作用时的滤波电感电流变化来直接计算矢量作用时间,简化了控制系统的设计。上述控制器在处理多变量问题时设计较为复杂,且未考虑系统的采样延迟问题。

APF的另一种控制策略是模型预测控制(model predictive control, MPC), MPC^[5]是一种依赖于系统数学模型来估计其未来行为的控制,并根据目标函数从这些估计值中计算出要应用的最优控制量。当应用于电力电子设备时, MPC相对于基于非线性模型的控制具有计算优势。该控制方法非常适合处理多变量问题,尤其适合处理交叉耦合状态变量^[6]。由于 MPC是一种基于模型的方法,其在模型参数变化很大时,会导致系统鲁棒性下降^[7],而在 APF的工作环境中,电网电压畸变是时常出现的,这将影响预测控制 V_{gabc} 的效果。为提高模型参数不匹配时预测控制的鲁棒性,文献[8]开发了一种电流控制器,使用重复控制和 H_∞ 控制来补偿建模误差并消除外部扰动。在文献[9]中,开发了一种考虑非线性模型的鲁棒滑模控制器(sliding mode controller, SMC),在存在模型参数不匹配和电网电压干扰的情况下表现出良好的性能。

本文提出了一种预测重复控制器,为抑制模型参数变化剧烈导致系统鲁棒性差这一情况提供了一种思路。通过建立弱电网下 APF 模型,并引入重复因子^[10],建立滤除了电网电压畸变的数学模型。在该模型下,使用预测控制得出下一拍控制向量,并使用电流误差来修正电流参考的方法来提高控制器的控制效果和响应速度。最后,通过仿真和实验验证了该方法的正确性和可行性。

1 弱电网下 APF 建模

图1是弱电网下的 APF 模型,由图1可知, L_1, L_2 和 C 为 LCL 滤波器的大电感、小电感和滤波电容; L_g 为电网感抗; R_g 为电网电阻; V_{invabc} 和 i_{L1abc} 为逆变输出的电压和电流; V_{cabc} 和 i_{cabc} 为滤波电容的电压和电流; i_{gabc} 为 APF 输出电流; $\tilde{V}_{gabc}$ 为畸变下的弱电网电压; V_{gabc} 为只含有基波的理想电网。为方便分析,设 $\tilde{V}_{gabc}$ 和 V_{gabc} 的差为除了基波分量的电网干扰 ε_{gabc} , 在三相静止坐标系下根据 KVL 和 KCL 定律易得:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{L1abc}}{dt} = V_{invabc} - V_{cabc} \\ (L_2 + L_g) \frac{di_{gabc}}{dt} = V_{cabc} - \tilde{V}_{gabc} - R_g i_{gabc} \\ i_{cabc} = C \frac{dV_{cabc}}{dt} \\ i_{L1abc} = i_{cabc} + i_{gabc} \\ \tilde{V}_{gabc} = V_{gabc} + \varepsilon_{gabc} \end{cases} \quad (1)$$

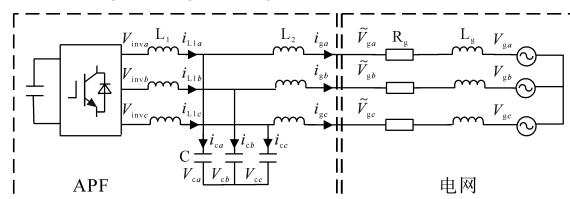


图1 弱电网下的 APF 模型

Fig.1 APF model in weak current network

三相坐标系下有源滤波器模型是时变非线性的耦合系统,为了解耦合并方便控制器设计,故把式(1)通过 Clarke 变换将 $a-b-c$ 坐标系变换到 $\alpha-\beta$ 坐标系下:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{L1\alpha\beta}}{dt} = V_{inv\alpha\beta} - V_{c\alpha\beta} \\ (L_2 + L_g) \frac{di_{g\alpha\beta}}{dt} = V_{c\alpha\beta} - \tilde{V}_{g\alpha\beta} - R_g i_{g\alpha\beta} \\ i_{c\alpha\beta} = C \frac{dV_{c\alpha\beta}}{dt} \\ i_{L1\alpha\beta} = i_{c\alpha\beta} + i_{g\alpha\beta} \\ \tilde{V}_{g\alpha\beta} = V_{g\alpha\beta} + \varepsilon_{g\alpha\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)是在 $\alpha-\beta$ 坐标系下的模型, α 表示实部, β 表示虚部。

将式(2)整理得:

$$\begin{aligned} \frac{di_{g\alpha\beta}}{dt} = & -\frac{(L_1/C) + R_g}{L_1 + L_2 + L_g} i_{g\alpha\beta} + \frac{L_1/C}{L_1 + L_2 + L_g} i_{L1} + \\ & \frac{1}{L_1 + L_2 + L_g} (V_{inv\alpha\beta} - V_{g\alpha\beta} - \varepsilon_{g\alpha\beta}) - \\ & \frac{L_1}{L_1 + L_2 + L_g} \frac{dV_{c\alpha\beta}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

在 $\alpha-\beta$ 坐标系下,设电流参考为 $i_{ref\alpha\beta}$, 电流误差为 $e_{\alpha\beta}$, 则得到:

$$e_{\alpha\beta} = i_{ref\alpha\beta} - i_{g\alpha\beta} \quad (4)$$

2 预测重复控制器设计

本节介绍预测重复控制系统设计,图2为 APF 系统控制框图,系统的设计目标是在电网电压畸变时, APF 也有较好的补偿性能。首先采集负载电流 i_i 、电网电流 i_{gabc} 、电网电压 $\tilde{V}_{gabc}$ 和滤波电

容电压 V_{cab} , 并通过锁相环锁相得到 A 相相位 θ 。其次由 A 相相位 θ 、负载电流 i_l 通过 i_p-i_q 法提取出谐波电流, 总母线电压控制采用 PI 控制的方式, PI 控制的输出与 i_p-i_q 法低通滤波的有功相加, 以实现控制母线电压平衡, 由于 i_p-i_q 法十分成熟, 在此不再赘述。接着, 通过 Clarke 变换到两相静止坐标系下, 使用预测重复控制作为电流控制内环, 得到预测控制量 $V_{inv\alpha\beta}(k+1)$, 将 $V_{inv\alpha\beta}(k+1)$ 经过 Clarke 反变换得到 $V_{invabc}(k+1)$ 。最后, 使用 $V_{invabc}(k+1)$ 作为 PWM 调制输出 APF 补偿电流。

预测重复控制器的思路为: 首先, 设计重复因子, 用于建立滤除电网系统干扰的 APF 数学模型, 然后在该模型的基础上, 使用预测控制, 得出最优控制信号, 并使用电流误差来修正电流参考。

2.1 系统干扰模型及处理

把式(3)、式(4)离散化后得:

$$i_{g\alpha\beta}(k+1) = Ai_{g\alpha\beta}(k) + B[V_{c\alpha\beta}(k) - V_{c\alpha\beta}(k-1)] + C[V_{inv\alpha\beta}(k) - V_{g\alpha\beta}(k) - \varepsilon_{g\alpha\beta}(k)] + Di_{l1\alpha\beta}(k) \quad (5)$$

$$e_{\alpha\beta}(k) = i_{ref\alpha\beta}(k) - i_{g\alpha\beta}(k) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} A = 1 - T \frac{L_1/C + R_g}{L_1 + L_2 + L_g} \\ B = -\frac{L_1}{L_1 + L_2 + L_g} \\ C = \frac{T}{L_1 + L_2 + L_g} \\ D = \frac{TL_1/C}{L_1 + L_2 + L_g} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i_{g\alpha\beta}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻 APF 流入电网的电

流; $i_{g\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻 APF 流入电网的电流; $V_{c\alpha\beta}(k)$, $V_{c\alpha\beta}(k-1)$ 分别为 k 时刻和 $k-1$ 时刻的滤波电容电压; $V_{inv\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻 APF 的逆变电压; $V_{g\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻只含有基波的理想电网; $\varepsilon_{g\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻除了基波分量的电网干扰; $e_{\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻电流误差; $i_{ref\alpha\beta}(k)$ 为 k 时刻电流参考; T 为控制周期。

为得到电网电压扰动和电流误差的离散化模型, 把式(5)代入式(6)得:

$$e_{\alpha\beta}(k+1) = Ae_{\alpha\beta}(k) + B[V_{c\alpha\beta}(k) - V_{c\alpha\beta}(k-1)] + C[V_{inv\alpha\beta}(k) - V_{g\alpha\beta}(k) - \varepsilon_{g\alpha\beta}(k)] + (I - D)i_{ref\alpha\beta}(k) \quad (8)$$

为削弱系统变量——电网电压的畸变对电流跟踪的不利影响, 引入了一个重复算子 $T(z^{-1})$, 满足 $\mu(k)T(z^{-1}) = 0$, 具体形式如下:

$$T(z^{-1}) = Z \left\{ \prod_{i=5,7,11,13,\dots}^n \frac{s^2 + w_i^2}{s^2 + 2w_i\xi_i s + w_i^2} \right\} = 1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2} + \dots + \alpha_\gamma z^{-\gamma} \quad (9)$$

式中: z^{-1} 为后移拍算子。

在三相三线制电网中, 主要存在如 5, 7, 11, 13 等 $6n \pm 1$ 次谐波, $\prod_{i=5,7,11,13,\dots}^n \frac{s^2 + w_i^2}{s^2 + 2w_i\xi_i s + w_i^2}$ 是陷波器的叠加, 针对主要扰动频率设计, 实现对状态变量和扰动变量谐波分量的有效跟踪。其中, i 为需跟踪的谐波分量次数; w_i 为对应的谐波频率; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\gamma$ 为离散化简后的系数。

当 $i = 5, 7, 11, 13$ 时, $T(z^{-1})$ 的 s 域 Bode 图如图 3 所示。可以看出, 在 5, 7, 11, 13 次谐波频率处, 其幅值响应呈陷波特性和, 故通过引入该因子, 电网电压中的影响被大幅削弱, 滤除了电网电压对系统电流变量的影响。

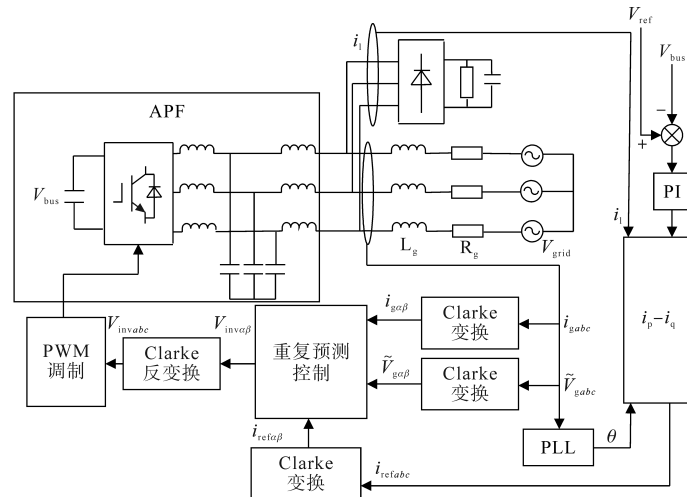
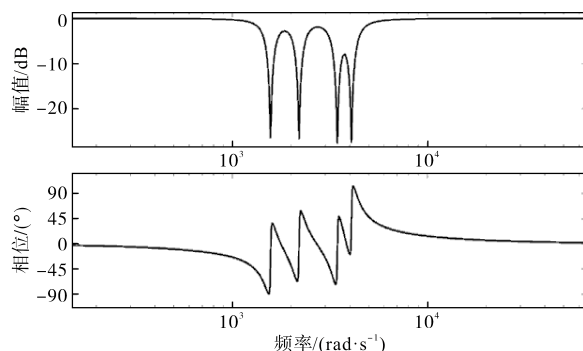


图2 弱电网畸变下的APF控制方案

Fig.2 APF control scheme under weak power grid distortion

图3 $T(z^{-1})$ 的s域Bode图Fig.3 Bode diagram of $T(z^{-1})$ in s domain

为了方便区分,变量加横线上角标表示该变量与重复算子 $T(z^{-1})$ 的乘积。可得:

$$\bar{e}_{\alpha\beta}(k_i) = e_{\alpha\beta}(k_i) + \alpha_1 e_{\alpha\beta}(k_i - 1) + \alpha_2 e_{\alpha\beta}(k_i - 2) + \cdots + \alpha_\gamma e_{\alpha\beta}(k_i - \gamma) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{\text{ca}\beta} &= \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k) - \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k-1) \\ &= V_{\text{ca}\beta}(k_i) - V_{\text{ca}\beta}(k_i - 1) + \\ &\quad \alpha_1 [V_{\text{ca}\beta}(k_i - 1) - V_{\text{ca}\beta}(k_i - 2)] + \cdots + \\ &\quad \alpha_\gamma [V_{\text{ca}\beta}(k_i - \gamma) - V_{\text{ca}\beta}(k_i - \gamma - 1)] \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\text{ga}\beta}(k_i) &= \tilde{V}_{\text{ga}\beta}(k_i) + \alpha_1 \tilde{V}_{\text{ga}\beta}(k_i - 1) + \\ &\quad \alpha_2 \tilde{V}_{\text{ga}\beta}(k_i - 2) + \cdots + \alpha_\gamma \tilde{V}_{\text{ga}\beta}(k_i - \gamma) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{i}_{\text{refa}\beta}(k_i) &= i_{\text{refa}\beta}(k_i) + \alpha_1 i_{\text{refa}\beta}(k_i - 1) + \\ &\quad \alpha_2 i_{\text{refa}\beta}(k_i - 2) + \cdots + \alpha_\gamma i_{\text{refa}\beta}(k_i - \gamma) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\text{inva}\beta}(k_i) &= V_{\text{inva}\beta}(k_i) + \alpha_1 V_{\text{inva}\beta}(k_i - 1) + \\ &\quad \alpha_2 V_{\text{inva}\beta}(k_i - 2) + \cdots + \alpha_\gamma V_{\text{inva}\beta}(k_i - \gamma) \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{inva}\beta}(k_i + 1) &= \bar{V}_{\text{inva}\beta}(k_i + 1) - \alpha_1 V_{\text{inva}\beta}(k_i) - \\ &\quad \alpha_2 V_{\text{inva}\beta}(k_i - 1) - \cdots - \alpha_\gamma V_{\text{inva}\beta}(k_i - \gamma + 1) \quad (15) \end{aligned}$$

将式(9)代入式(8)得到消除电网系统干扰的模型:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{\alpha\beta}(k+1) &= A\bar{e}_{\alpha\beta}(k) + B[\bar{V}_{\text{ca}\beta}(k) - \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k-1)] + \\ &\quad C[\bar{V}_{\text{inva}\beta}(k) - \bar{V}_{\text{ga}\beta}(k)] + (I - D)\bar{i}_{\text{refa}\beta}(k) \quad (16) \end{aligned}$$

其中, $\bar{e}_{\alpha\beta}(k+1)$, $\bar{e}_{\alpha\beta}(k)$, $\bar{V}_{\text{ca}\beta}(k) - \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k-1)$, $\bar{V}_{\text{inva}\beta}(k)$, $\bar{V}_{\text{ga}\beta}(k)$, $\bar{i}_{\text{refa}\beta}(k)$ 分别为 $e_{\alpha\beta}(k+1)$, $e_{\alpha\beta}(k)$, $V_{\text{ca}\beta}(k) - V_{\text{ca}\beta}(k-1)$, $V_{\text{inva}\beta}(k)$, $V_{\text{ga}\beta}(k)$, $i_{\text{refa}\beta}(k)$ 与重复因子 $T(z^{-1})$ 的乘积。

2.2 预测重复控制

得到经过消除电网电压系统干扰的模型式(16)后,就可应用在预测控制以求解最优控制向量,设 N_c 为控制时域, N_p 为预测时域, $N_c \leq N_p$ 。为方便求解成本方程,把相关变量写成向量形式,如下式所示:

$$V_{\text{inva}\beta}(k_i) = [\bar{v}_{\text{inva}\beta}(k_i)^T \bar{v}_{\text{inva}\beta}(k_i + 1)^T \cdots \bar{v}_{\text{inva}\beta}(k_i + N_c - 1)^T]^T \quad (17)$$

$$E_{\alpha\beta}(k_i) = [\bar{e}_{\alpha\beta}(k_i|k_i)^T \bar{e}_{\alpha\beta}(k_i + 1|k_i)^T \cdots \bar{e}_{\alpha\beta}(k_i + N_p - 1|k_i)^T]^T \quad (18)$$

$$V_{\text{ga}\beta}(k_i) = [\bar{v}_{\text{ga}\beta}(k_i|k_i)^T \bar{v}_{\text{ga}\beta}(k_i + 1|k_i)^T \cdots \bar{v}_{\text{ga}\beta}(k_i + N_p - 1|k_i)^T]^T \quad (19)$$

$$i_{\text{refa}\beta}(k_i) = [\bar{i}_{\text{refa}\beta}(k_i|k_i)^T \bar{i}_{\text{refa}\beta}(k_i + 1|k_i)^T \cdots \bar{i}_{\text{refa}\beta}(k_i + N_p - 1|k_i)^T]^T \quad (20)$$

$$\Delta V_{\text{ca}\beta}(k_i) = [\Delta \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k_i|k_i)^T \Delta \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k_i + 1|k_i)^T \cdots \Delta \bar{V}_{\text{ca}\beta}(k_i + N_p - 1|k_i)^T]^T \quad (21)$$

由式(10)到式(21)可得电流误差未来状态向量的表达式:

$$\begin{aligned} E_{\alpha\beta} &= G e_{\alpha\beta}(k_i) + M V_{\text{inva}\beta}(k_i) + H \Delta V_{\text{ca}\beta}(k_i) - \\ &\quad Q V_{\text{ga}\beta}(k_i) + P i_{\text{refa}\beta}(k_i) \quad (22) \end{aligned}$$

式中: G, M, H, Q, P 为系数矩阵。

设计代价函数为

$$J = E_{\alpha\beta}^T(k_i) W_e E_{\alpha\beta}(k_i) + V_{\text{inva}\beta}^T(k_i) W_u V_{\text{inva}\beta}(k_i) \quad (23)$$

其中, W_e 为半正定对称对角块矩阵,用于加权状态向量中的误差; W_u 为正定对称矩阵,用于加权系统控制量,这些系数可以使用文献[11]中提出的方法进行调整; $E_{\alpha\beta}(k_i)$, $V_{\text{inva}\beta}(k_i)$ 是经过重复算子处理的向量。

预测重复控制器的设计目的是找到最优控制向量 $V_{\text{inva}\beta}(k_i)$,使得代价函数 J 最小化,将式(22)代入式(23),并对 $V_{\text{inva}\beta}(k_i)$ 求导获得最优控制向量为

$$V_{\text{inva}\beta}(k_i) = -(M^T W_e M + W_u)^{-1} \{ M^T W_e [G e_{\alpha\beta}(k_i) + H \Delta V_{\text{ca}\beta}(k_i) + Q V_{\text{ga}\beta}(k_i) + P i_{\text{refa}\beta}(k_i)] \} \quad (24)$$

求解式(24)可得最优控制向量 $V_{\text{inva}\beta}(k_i)$ 。

为了进一步增强预测重复控制的跟踪效果,使用电流误差 $e_{\alpha\beta}$ 来矫正电流参考 $i_{\text{refa}\beta}$,在式(17)~式(21)中用 $(i_{\text{refa}\beta} + e_{\alpha\beta})$ 代替 $i_{\text{refa}\beta}$ 来求得 $\bar{i}_{\text{refa}\beta}$ 。

2.3 预测重复控制具体步骤

预测重复控制的具体步骤如下:

1)通过ADC采样和Clarke变换得到电网电压 $\tilde{V}_{\text{ga}\beta}$ 、电网电流 $i_{\text{ga}\beta}$ 、电容电压 $V_{\text{ca}\beta}$ 、负载电流 $i_{\text{la}\beta}$ 、母线电压 V_{bus} ,由负载电流 $i_{\text{la}\beta}$ 和母线电压 V_{bus} 得到电流给定 $i_{\text{refa}\beta}$ 和电流误差 $e_{\alpha\beta}$ 。

2)根据式(10)~式(16)得到消除系统扰动的变量 $\bar{e}_{\alpha\beta}$, $\Delta \bar{V}_{\text{ca}\beta}$, $\bar{V}_{\text{ga}\beta}$ 和 $\bar{i}_{\text{refa}\beta}$,值得注意的是,要使用 $(i_{\text{refa}\beta} + e_{\alpha\beta})$ 代替 $i_{\text{refa}\beta}$ 来求得 $\bar{i}_{\text{refa}\beta}$ 。

3)把1)和2)两步骤得到的变量代入式(24)得到 $\bar{V}_{\text{inva}\beta}(k_i + 1)$,并由式(10)得到预测控制量

$V_{inv\alpha\beta}(k_i + 1)$,将 $V_{inv\alpha\beta}(k_i + 1)$ 经过反 Clarke 变换得到 $V_{invabc}(k_i + 1)$,用于 PWM 调制。

3 仿真和实验结果

本文将预测重复控制方法与传统预测控制方法比较,通过 Matlab/Simulink 仿真,且进行了多项实验,并对仿真和实验的结果进行分析。

3.1 仿真

在 Matlab/Simulink 仿真环境中搭建 APF 仿真模型,仿真器件参数如表 1 所示。

表 1 仿真器件参数表

Tab.1 Simulation device parameter table

参数	数值
电网电压	380 V/50 Hz
直流侧母线电压	1 400 V
开关频率	20 kHz
整流桥直流侧负载	20 Ω
LCL滤波器	70 μ H, 15 μ H, 5 μ F

本文仿真采用三相整流非线性负载和可控电压源,以模拟电网电压畸变的 APF 补偿谐波的工作环境,可控电压源设置如表 2 所示。

表 2 可控电压源设置

Tab.2 Controllable voltage source settings

名称	电压有效值/V	百分比/%
基波	380	100
5	14.95	3.94
7	11.95	3.15
11	8.95	2.36
13	5.70	1.50

首先,使用传统预测控制方法,在电网畸变的情况下,补偿非线性负载,仿真结果如图 4 所示。由图 4a 可知补偿电流有些许振荡,电网电流波形畸变较为明显,电流跟踪效果较差;由图 4b 可知电网电流 THD 值为 11.88%,不太理想。

接着,使用预测重复控制方法,在电网畸变的情况下,补偿非线性负载,仿真结果如图 5 所示。由图 5a 可知补偿电流振荡较小,电网电流波形畸变较小;由图 5b 可知电网电流 THD 值为 3.06%,相比于传统控制方法,电网电流 THD 值更低,电流质量更好。

图 6 展示了预测重复补偿动态负载的仿真结果,可以看出,负载电流突然增加后,补偿电流和电网电流在一个电网工频时间内再次达到稳态,动态响应良好。求解 $\bar{i}_{ref\alpha\beta}$ 时使用参考电流和电流误差 $(i_{ref\alpha\beta} + e_{\alpha\beta})$ 来修正 $i_{g\alpha\beta}$,这增强了预测重复控

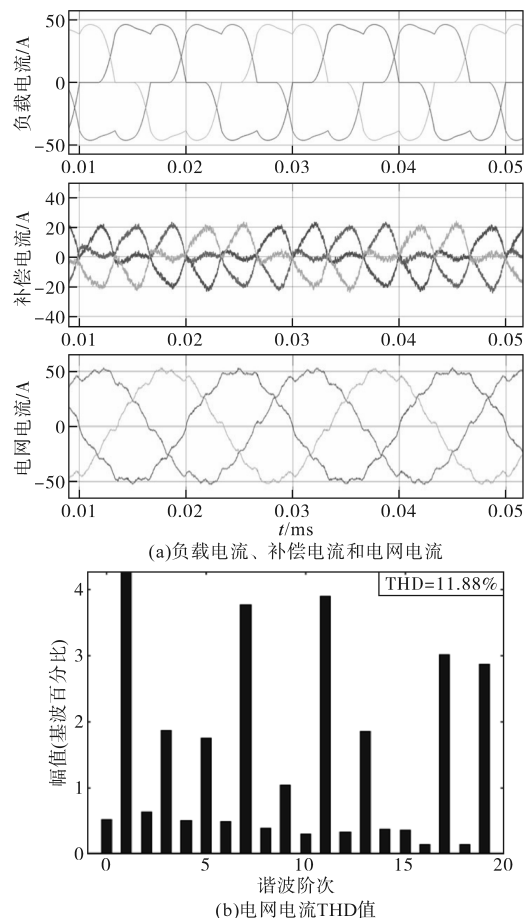


图 4 传统预测控制方法仿真结果

Fig.4 Simulation results of traditional predictive control method

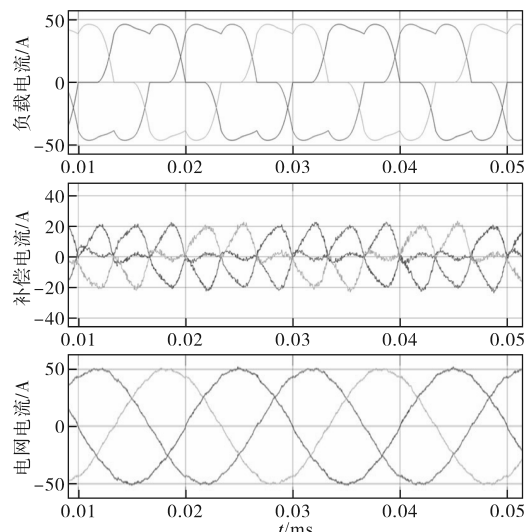
制的动态性能。

3.2 实验

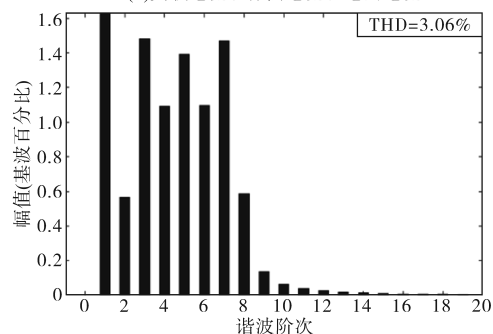
为验证所提出控制器的有效性,进行了多项实验,所有测试均基于如图 7 所示实验平台。实验中采用“DSP+FPGA”双核设计,DSP 芯片负责系统的主要控制任务,包括电压电流采样、计算与 PWM 生成。FPGA 负责给 PWM 信号加死区,并能及时响应故障。编译环境分别为 Code Composer Studio 和 Quartus II 12.0。本次实验的器件参数和可控电压源设置的电压畸变参数和仿真一致。

首先,使用传统预测控制方法,和仿真的工况一致,在电网畸变的情况下,补偿非线性负载,实验结果如图 8 所示。由图 8a 可知补偿电流有些许振荡,电网电流波形畸变较为明显,电流跟踪效果较差;由图 8b 可知,质量分析仪显示电网电流 THD 值为 10.18%,不太理想。

接着,使用预测重复控制方法,实验结果如图 9 所示。由图 9a 可知预测重复控制方法电网电流波形畸变较小;由图 9b 可知,质量分析仪显



(a)负载电流、补偿电流和电网电流



(b)电网电流THD值

图5 预测重复控制方法仿真结果

Fig.5 Simulation results of predictive repetitive control method

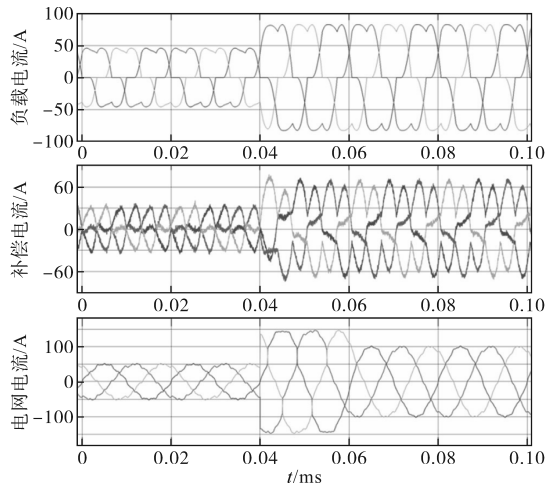


图6 预测重复方法动态性能仿真图

Fig.6 Simulation diagram of dynamic performance of predictive repetitive method

示电网电流THD值为4.26%,效果令人满意,和仿真结果接近。

图10展示了预测重复控制方法补偿动态负载的实验结果。负载电流在突然增加后,补偿电流和电网电流在一个电网工频时间内再次达到稳态,动态响应良好。

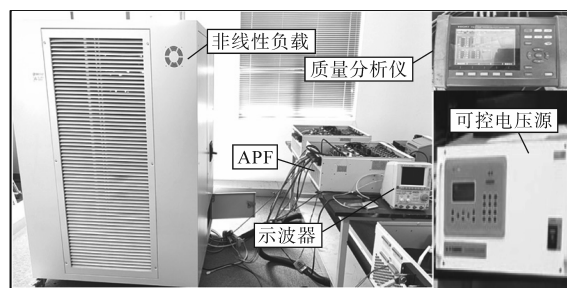
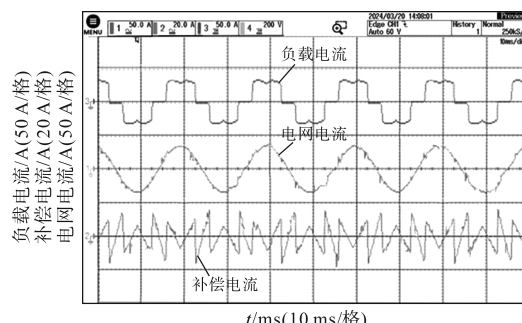


图7 实验平台

Fig.7 Experimental platform



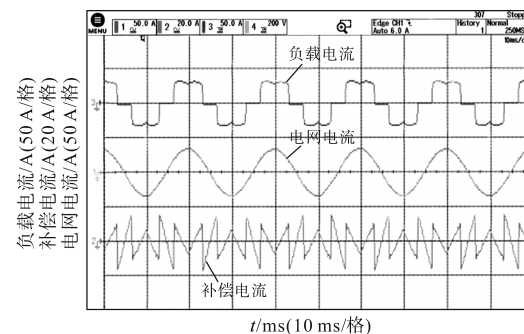
(a)负载电流、补偿电流和电网电流

MONITOR 7/8		MODE: 清單		EVENT: 0	
Start:-----	Time:-----	Freq		50.02 MHz	
I	电平	iharm	OFF	Ithd-f	10.18
00:	0.01 A	13:	1.68	26:	0.13
01:	28.88	14:	0.13	27:	0.24
02:	0.13	15:	0.26	28:	0.11
03:	0.28	16:	0.12	29:	0.97
04:	0.13	17:	1.79	30:	0.07
05:	3.59	18:	0.06	31:	0.62
06:	0.06	19:	1.08	32:	0.13
07:	2.87	20:	0.13	33:	0.24
08:	0.13	21:	0.26	34:	0.10
09:	0.24	22:	0.12	35:	0.77
10:	0.12	23:	1.27	36:	0.07
11:	1.87	24:	0.06	37:	0.49
12:	0.06	25:	0.78	38:	0.13

(b)电网电流THD值

图8 传统预测控制方法实验结果

Fig.8 Experimental results of traditional predictive control methods



(a)负载电流、补偿电流和电网电流

01:27: 5.500 1000 500M CH1:1000 500M 01690V F150E		SD 33000					
MONITOR 7/8 滤波：通带		EVENT 0					
Start: 1.000000		Time: 49.98 Hz					
1 CH1 电平		Iharm OFF Ithd-F 4.26 Hz					
00:	- 0.04 A	13:	0.48	26:	0.02	39:	0.02
01:	27.56	14:	0.02	27:	0.03	40:	0.02
02:	0.02	15:	0.03	28:	0.02	41:	0.16
03:	0.06	16:	0.02	29:	0.23	42:	0.02
04:	0.02	17:	0.42	30:	0.02	43:	0.16
05:	1.52	18:	0.02	31:	0.22	44:	0.02
06:	0.02	19:	0.33	32:	0.02	45:	0.02
07:	0.93	20:	0.02	33:	0.02	46:	0.02
08:	0.02	21:	0.02	34:	0.02	47:	0.13
09:	0.02	22:	0.02	35:	0.18	48:	0.02
10:	0.03	23:	0.30	36:	0.02	49:	0.14
11:	0.68	24:	0.02	37:	0.19	50:	0.02
12:	0.02	25:	0.26	38:	0.02		

(b)电网电流THD值

图9 预测重复控制方法实验结果

Fig.9 Experimental results of predictive repetitive control method

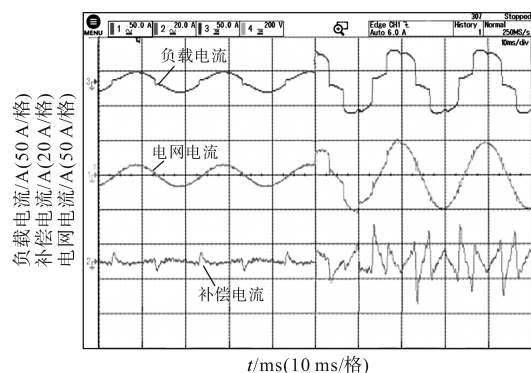


图10 预测重复方法动态性能实验图

Fig.10 Experimental diagram of dynamic performance of predictive repetitive method

4 结论

本文提出预测重复控制用于APF电流控制,有效解决了系统变量——电网电压变化剧烈时预测控制效果较差的问题。实验结果显示,在电网畸变的工况下,电网电流THD为4.26%,且负载突变后一个工频周期内恢复稳态,展现出良好的谐波抑制和响应性能。

但该方法也有一定的局限性。首先,计算量大,根据所选的时域(无论是预测时域还是控制时域),执行增益计算所需的运算量会显著增加;同时,加权矩阵和惩罚系数的选择依赖经验,可能非最优。未来可借助系统辨识或优化算法优化参数,提升鲁棒性和精度。

参考文献

- [1] 邢挺,陈凯琦,王雨琦,等. 适用于铁路自洽微网的储能变流器离网模式控制研究[J]. 电力电子技术,2025,25(2):1-6.
Xing T, Chen K Q, Wang Y Q, et al. Research on off-grid mode control of energy storage converter for railway self-consistent microgrid[J]. Power Electronics, 2025, 25(2): 1-6.
- [2] 王君瑞,豆帅,王铭,等. 虚拟阻抗+QPR控制的MMC-HVDC环流抑制策略[J/OL]. 电源学报:(2024-12-24)[2025-01-20].
<https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241223.1730.002>.
Wang J R, Dou S, Wang M, et al. Suppression strategy of MMC-HVDC circulation controlled by virtual impedance+QPR[J/OL]. Journal of Power Supply: (2024-12-24)[2025-01-20]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241223.1730.002>.
- [3] Zhu M Z, Liu J Q, Chen L J, et al. Stability-improved repetitive control for inverters considering PLLs under weak grid conditions[J]. Journal of Power Electronics, 2024, 25: 698-708.
- [4] Wu T F, Chang C H, Lin L C, et al. Two-phase modulated digital control for three-phase bidirectional inverter with wide inductance variation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1598-1607.
- [5] 黄海宏,颜碧琛,王海欣,等. 并联级联H桥电源电流跟踪优化与环流抑制的模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4376-4390.
Huang H H, Yan B C, Wang H X, et al. Model predictive control for current tracking optimization and circulation suppression of parallel cascade H-bridge power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4376-4390.
- [6] Marchi R A D, Bim E. A predictive direct power control applied to the doubly fed induction generator under voltage dip [C]/IEEE International Conference on Industrial Technology. 2015: 2230-2235.
- [7] Dragičević T, Vazquez S, Wheeler P, et al. Advanced control methods for power converters in DG systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 5847-5862.
- [8] Rigatos G, Siano P, Cecati C, et al. A new non-linear H-infinity feedback control approach for three-phase voltage source converters[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 44(3): 302-312.
- [9] Sufyan A, Jamil M, Ghafoor S, et al. A robust nonlinear sliding mode controller for a three-phase grid-connected inverter with an LCL filter[J]. Energies, 2022, 15(24): 9428.
- [10] Lunardi A, Conde E, Assis J, et al. Repetitive predictive control for current control of grid-connected inverter under distorted voltage conditions[J]. IEEE Access, 2022, 10: 16931-16941.
- [11] Rodrigues L L, Vilcanqui O A C, Murari A L L, et al. Predictive power control for DFIG: a fare-based weighting matrices approach[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(2): 967-975.

收稿日期:2025-01-20

修改稿日期:2025-03-04