

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615336

并网逆变器自适应事件触发无模型预测控制策略

刘春喜¹, 蔡 磊¹, 赵文江¹, 李世纪², 王 禹¹

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105; 2. 国网吉林省电力有限公司
超高压公司变电检修中心 长春 130000)

摘 要:针对传统有限控制集模型预测控制参数敏感性强、周期性寻优计算负担大及数字控制延迟劣化电流质量等问题,提出一种并网逆变器自适应事件触发无模型预测控制策略。该方法以并网电流误差为滑模变量构建无模型电压矢量评价函数,引入零矢量偏置与开关状态二次筛选,兼顾系统动态响应、稳态纹波抑制与开关损耗优化;融合自适应误差阈值、滑模趋近方向及电网电压动态变化设计复合事件触发机制,实现电压矢量按需寻优;采用带遗忘因子递推更新的电流增量查表法,通过状态外推有效补偿一拍控制延迟。仿真结果表明,滤波电感降至标称值 50% 时,所提方法并网电流总谐波畸变率为 2.29%,较传统有限控制集模型预测控制与基于电流差的无模型预测控制分别降低 42.75% 和 10.89%,可在电压跌落、电网不平衡、背景谐波及弱电网工况下稳定运行。实验结果表明,电感参数失配时,该方法电流总谐波畸变率为 2.79%,参考电流突变调节时间为 0.582 ms,在线寻优次数减少 60.54%,平均执行时间降至 10.41 μ s。开关状态二次筛选可使平均开关频率与开关损耗分别降低 12.88% 和 12.09%,延迟补偿可将谐波畸变率由 2.62% 降至 2.38%。以上结果表明,所提方法可有效提升系统参数鲁棒性、动态响应速度、并网电流质量与实时运算性能,展现了良好的工程应用价值。

关键词: 并网逆变器; 无模型预测控制; 自适应事件触发机制; 延迟补偿

中图分类号: TM464 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Adaptive event-triggered model-free predictive control strategy for grid-connected inverters

Liu Chunxi¹, Cai Lei¹, Zhao Wenjiang¹, Li Shiji², Wang Yu¹

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd. Ultra High Voltage Company Substation Maintenance Center, Changchun 130000, China)

Abstract: To address the high sensitivity to model-parameter mismatch, the heavy computational burden caused by periodic optimization, and the degradation of grid-current quality induced by digital control delay in conventional finite-control-set model predictive control, an adaptive event-triggered model-free predictive control strategy is proposed for grid-connected inverters. A model-free voltage-vector evaluation function is constructed by taking the grid-current tracking error as the sliding-mode variable. A zero-vector bias and a secondary switching-state screening mechanism are introduced to balance dynamic response, steady-state ripple suppression, and switching-loss reduction. Furthermore, a composite event-triggering mechanism incorporating adaptive error thresholds, the sliding-mode reaching direction, and grid-voltage variations is developed to enable on-demand voltage-vector optimization. A recursively updated current-increment lookup table with a forgetting factor is employed to compensate for the one-sample control delay through state extrapolation. Simulation results show that, when the filter inductance is reduced to 50% of its nominal value, the total harmonic distortion of the grid current achieved by the proposed method is 2.29%, which is 42.75% and 10.89% lower than that of conventional finite-control-set model predictive control and 10.89% lower than that of current-difference-based model-free predictive control, respectively. Stable operation is also maintained under conditions of grid-voltage sag, voltage unbalance, background harmonics, and weak-grid conditions. Experimental results demonstrate that, under inductance mismatch, the total harmonic distortion of the grid current is 2.79%, the settling time following a reference-current step change is 0.582 ms, the number of online optimization operations is

reduced by 60.54%, and the average execution time is reduced to 10.41 μ s. The secondary switching-state screening mechanism reduces the average switching frequency and switching loss by 12.88% and 12.09%, respectively, while the delay compensation decreases the total harmonic distortion of the grid current from 2.62% to 2.38%. These results demonstrate that the proposed strategy effectively improves parameter robustness, dynamic response, grid-current quality, and real-time computational performance, confirming its potential for practical engineering applications.

Keywords: grid-connected inverter; model-free predictive control; adaptive event triggering mechanism; delay compensation

0 引言

随着新能源发电和分布式电源接入比例不断提高,并网逆变器作为新能源发电单元与电网之间的关键接口^[1],其控制性能直接影响并网电流质量以及电网扰动下的运行稳定性^[2-3]。有限控制集模型预测控制(finite control set model predictive control, FCS-MPC)具有结构简单、动态响应快、无需调制环节等优点^[4-5],已广泛应用于并网逆变器^[6]、多电平变换器等电力电子系统中^[7-8]。然而,FCS-MPC需要依赖精确数学模型,当滤波电感、线路电阻等参数因温升、磁饱和、器件老化及工况变化发生偏移时^[9],预测电流与实际电流之间将产生偏差,进而导致评价函数失准和最优电压矢量误选,降低并网电流质量和系统的扰动适应能力^[10-11]。

针对模型参数失配问题,已有研究主要从参数辨识、自适应修正和鲁棒控制等方面进行改进。文献[12]采用参数自适应修正方法提高中性点钳位型并网逆变器的预测精度;文献[13-14]通过电感在线辨识增强预测控制对参数变化的适应能力,并改善并网逆变器及三电平逆变器的运行性能;文献[15]采用鲁棒预测电流控制提高参数扰动下的控制效果。上述方法能够减弱参数失配对FCS-MPC的影响,但其控制性能仍依赖参数辨识精度或不确定性边界选取的制约,在复杂扰动条件下存在一定局限。

为降低预测控制对精确模型参数的依赖,无模型预测控制(model-free predictive control, MFPC)逐渐受到关注。文献[16-17]采用基于电流响应信息的无模型预测控制方法,降低了控制器对电感、电阻等参数的依赖;文献[18]提出调制型无模型预测电流控制方法,以改善停滞问题并抑制电流纹波;文献[19-20]分别结合带外源输入的自回归模型、递推最小二乘法和卡尔曼滤波等方法,提高逆变器在复杂工况下的鲁棒性。现有MFPC方法能够缓解传统FCS-MPC对精确参数的依赖,但多数方法仍采用周期性寻优,需要在每个采样周期内遍历候选电压矢量,增加了数字控制器的实时计算负担,限制了其在高采样频率并网装置中的应用。

此外,数字控制系统中的采样、计算和脉宽调制(pulse width modulation, PWM)更新会引入一拍控制延迟,使寻优所依据的电流状态与电压矢量实际作用时刻

不一致,进而影响动态响应和稳态电流质量。针对计算量与控制延迟问题,文献[21-22]分别采用快速寻优和多矢量预测方法改善控制性能,文献[23]通过两步预测和延迟补偿削弱数字延迟的不利影响。然而,如何在保持MFPC参数鲁棒性的同时减少冗余寻优并补偿控制延迟,仍是其工程应用中亟待解决的问题。

鉴于此,本文研究一种适用于新能源并网逆变器的自适应事件触发无模型预测控制策略。针对并网控制存在的模型依赖性强、运算开销大及控制延迟等问题开展协同优化设计,结合滑模趋近机理构建预测评价函数,完成电压矢量遴选,通过零矢量偏置与开关状态筛选兼顾动态特性、稳态精度与开关损耗。融合电流偏差、滑模状态与电网扰动设计自适应触发机制削减冗余运算,依托查表法补偿控制延迟,构建闭环控制体系,可为逆变器高效稳定并网控制提供技术参考。

1 FCS-MPC方法及参数扰动分析

1.1 FCS-MPC方法

FCS-MPC利用被控对象的离散数学模型预测有限开关状态对应的未来电流响应,并通过评价函数比较候选电压矢量的控制效果,选择评价函数最小的开关状态作用于逆变器。该方法结构简单、动态响应快且无需调制环节,但其预测精度和寻优结果依赖系统模型参数的准确性。

电压源型三相两电平并网逆变器的拓扑结构如图1所示, V_{dc} 表示逆变器直流侧电压, R 和 L 分别表示线路等效电阻和滤波电感, e_a 、 e_b 、 e_c 表示网侧电压, i_a 、 i_b 、 i_c 表示三相并网电流。

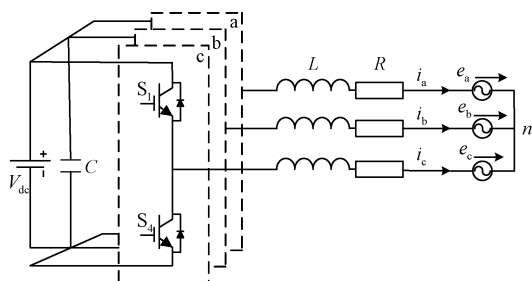


图1 并网逆变器拓扑

Fig. 1 Topology of grid-connected inverter

通过 Clarke 变换将并网逆变器数学模型从三相静止 abc 坐标系转换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的连续时间状态空间方程为^[14]:

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = u_\alpha - Ri_\alpha - e_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = u_\beta - Ri_\beta - e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_α, i_β 为逆变器输出电流矢量在 $\alpha\beta$ 轴的分量; u_α, u_β 为逆变器桥臂输出电压矢量在 $\alpha\beta$ 轴的分量; e_α, e_β 为电网电压矢量在 $\alpha\beta$ 轴的分量。

为实现数字控制,需对连续模型进行离散化。采用前向欧拉法,在采样周期 T_s 足够小的条件下,对式(1)进行离散化处理,得到 $k+1$ 时刻的电流预测模型:

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_\alpha(k) + \frac{T_s}{L} (u_\alpha(k) - e_\alpha(k)) \\ i_\beta(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_\beta(k) + \frac{T_s}{L} (u_\beta(k) - e_\beta(k)) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)建立了 k 时刻电压矢量 $\mathbf{u}_{\alpha\beta}(k)$ 与 $k+1$ 时刻的预测电流 $\mathbf{i}_{\alpha\beta}(k+1)$ 之间的关系,是 FCS-MPC 进行电流预测和矢量寻优的基础。

对于三相两电平逆变器,其有限控制集包含 8 个候选电压矢量。FCS-MPC 在每个采样周期内将全部候选电压矢量代入式(2),得到对应的预测电流,并通过评价函数进行比较,选取使评价函数最小的电压矢量进行应用。评价函数通常定义为:

$$g = |i_\alpha^{\text{ref}}(k+1) - i_\alpha(k+1)|^2 + |i_\beta^{\text{ref}}(k+1) - i_\beta(k+1)|^2 \quad (3)$$

式中: $i_\alpha^{\text{ref}}(k+1), i_\beta^{\text{ref}}(k+1)$ 表示 $k+1$ 时刻逆变器并网电流参考值。

由式(2)可知, FCS-MPC 的预测电流十分依赖电感 L 和电阻 R 。当系统实际参数因温升、磁饱和、器件老化或运行工况变化而偏离控制器标称参数时,预测电流将与真实电流响应产生偏差,进而导致评价函数失准和最优电压矢量误选。

1.2 参数扰动敏感性分析

在实际系统中参数 R 和 L 会因工况和环境发生变化,导致控制器内部模型参数 (L_0, R_0) 与实际对象参数 (L, R) 失配,即 $L = L_0 + \Delta L, R = R_0 + \Delta R$,这将严重影响系统性能。为直观说明参数扰动对预测结果的影响,绘制了参数 $R/R_0, L/L_0$ 在 $[0.5, 2]$ 变化下预测电流误差变化三维图,结果如图2所示。

图2表明,电阻扰动对预测电流的影响相对有限,而电感变化会显著改变预测电流幅值。进一步假设控制器电感参数为 L_0 ,在忽略高阶小量的情况下,电感失配导

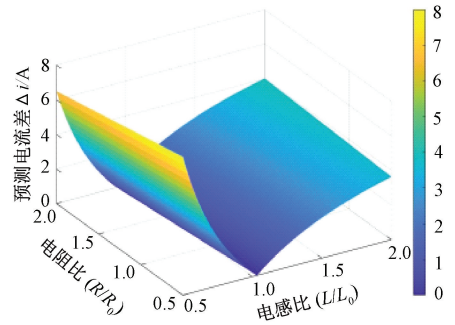


图2 R, L 扰动对预测电流影响

Fig. 2 The influence of R and L disturbances on the predicted current

致的预测电流误差可写为:

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

式中: $\Delta i_\alpha(k+1), \Delta i_\beta(k+1)$ 表示 $\alpha\beta$ 轴的预测电流误差; ΔL 表示控制器理想电感参数与实际电感参数的差值。

由式(4)可知,电感偏差会直接影响电流变化率的预测结果,使评价函数不能准确反映各候选电压矢量的真实控制效果。此外,预测误差 $\Delta i_\alpha(k+1), \Delta i_\beta(k+1)$ 还受系统当前运行状态的强烈影响。在动态调节或偏离额定运行条件时,这种影响会被进一步放大。因此,探索无模型预测控制策略对于提升并网逆变器的扰动适应能力具有重要意义。

此外, FCS-MPC 需在每个采样周期内遍历全部候选电压矢量。当采样频率提高、变换器拓扑变复杂或控制目标增加时,周期性寻优将显著增加计算负担。尤其在稳态阶段,电流误差变化较小,连续执行完整寻优会产生大量冗余计算。因此,在保证控制性能的前提下降低在线寻优频率,是提高预测控制实时性的必要途径。

2 基于滑模趋近律的无模型预测控制方法

为降低参数不确定性对预测控制性能的影响,在无模型预测控制框架中引入离散滑模趋近思想,根据电流误差状态约束系统轨迹向滑模面收敛,从而提高系统对参数摄动和外部扰动的鲁棒性。

2.1 基于离散滑模趋近律的控制器设计

考虑参数摄动、网压扰动及未建模部分扰动的影响,并网逆变器离散域电流模型可统一写为:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + T_s [\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{d}(k)] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}(k) = [i_\alpha(k) \ i_\beta(k)]^T$ 为并网电流矢量; $\mathbf{u}(k) = [u_\alpha(k) \ u_\beta(k)]^T$, $\mathbf{d}(k) = [d_\alpha(k) \ d_\beta(k)]^T$ 分别为候选电压矢量与集总扰动项; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 为与系统动态相关的等效系数矩阵。与传统 FCS-MPC 不同, 后续控制律不直接依赖 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 的精确取值, 而是依据电流误差变化方向构造矢量选择准则。

滑模面应直接体现并网电流跟踪目标。定义电流跟踪误差为:

$$\boldsymbol{\sigma}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}^*(k) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}^*(k) = [i_\alpha^*(k) \ i_\beta^*(k)]^T$ 为参考电流矢量。

为进一步使系统状态向滑模面收敛, 离散滑模趋近条件可表示为:

$$\boldsymbol{\sigma}(k+1)\boldsymbol{\sigma}(k) < 0 \quad (7)$$

在采样周期足够小的条件下, 参考电流在一个控制周期内可近似保持不变。正常工频运行时参考电流的单周期变化较小, 因此该假设能够满足。对于电网电压不平衡、频率偏移或指令电流快速变化等工况, 参考电流变化不可忽略, 可将其与参数摄动、网压扰动及未建模动态共同归入辅助项。只要参考电流变化率及综合扰动有界, 候选电压矢量仍能使电流误差向滑模面邻域收敛; 当参考电流变化过快时, 离散滑模趋近条件可能短时受到破坏, 并使跟踪误差上界增大。此时, 后续所提复合事件触发机制将在误差越界或趋近方向改变时重新执行电压矢量寻优, 从而抑制误差持续扩大, 保证系统误差最终有界。

为避免控制律直接依赖系统参数, 将参数、网压和未建模部分等影响统一归入辅助项, 定义辅助项为:

$$\boldsymbol{\varphi}(k) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{d}(k)) \quad (8)$$

则不同候选电压矢量对滑模面趋近方向的影响可由 $\mathbf{u}(k) + \boldsymbol{\varphi}(k)$ 表征。根据离散滑模趋近条件, 可构造候选电压矢量评价函数为:

$$g(\mathbf{u}_i) = \sigma_\alpha(k)[u_{\alpha i}(k) + \varphi_\alpha(k)] + \sigma_\beta(k)[u_{\beta i}(k) + \varphi_\beta(k)] \quad (9)$$

式中: $\sigma_\alpha(k)$ 、 $\sigma_\beta(k)$ 分别为 α 、 β 轴滑模变量分量。

式(9)以滑模变量趋近为核心评价候选电压矢量的控制效果, 与传统 FCS-MPC 直接最小化预测电流误差不同, 该评价函数无需精确的 R 、 L 参数。

进一步通过枚举, 对比所有可能电压矢量所对应的 g 值, 可以得到最佳的电压矢量, 定义电压矢量控制集 $\mathcal{D} = \{\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \mathbf{u}_3 \ \mathbf{u}_4 \ \mathbf{u}_5 \ \mathbf{u}_6 \ \mathbf{u}_7\}$, 最优电压矢量满足:

$$\mathbf{u}_{\text{opt}}(k) = \underset{\mathbf{u}_i \in \mathcal{D}}{\text{argmin}}(g(\mathbf{u}_i)) \quad (10)$$

式中: $g_s(\mathbf{u}_i) = \sigma_\alpha(k)u_{\alpha}(\mathbf{u}_i) + \sigma_\beta(k)u_{\beta}(\mathbf{u}_i)$, 进一步定义 $\alpha\beta$ 轴的等效开关状态为:

$$\begin{bmatrix} S_\alpha(\mathbf{u}_i) \\ S_\beta(\mathbf{u}_i) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} 2S_a(\mathbf{u}_i) - S_b(\mathbf{u}_i) - S_c(\mathbf{u}_i) \\ 2S_b(\mathbf{u}_i) - S_a(\mathbf{u}_i) - S_c(\mathbf{u}_i) \\ 2S_c(\mathbf{u}_i) - S_a(\mathbf{u}_i) - S_b(\mathbf{u}_i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此, 式(9)可重写为:

$$g_s(\mathbf{u}_i) = \frac{V_{\text{dc}}}{3}[\sigma_\alpha(k)S_\alpha(\mathbf{u}_i) + \sigma_\beta(k)S_\beta(\mathbf{u}_i)] \quad (12)$$

由于直流电压 V_{dc} 恒为正, 式(12)可进一步写为:

$$g_{\text{eq}}(\mathbf{u}_i) = \sigma_\alpha(k)S_\alpha(\mathbf{u}_i) + \sigma_\beta(k)S_\beta(\mathbf{u}_i) \quad (13)$$

式(13)不含直流侧电压幅值, 可减小直流电压测量误差对控制决策的影响。该评价函数能够保证电流误差向滑模面收敛, 但在小误差区域内持续选择有效电压矢量可能引起参考值附近的往复振荡, 增加稳态纹波, 因此需要进一步修正。

2.2 评价函数修正与矢量二次筛选

为兼顾动态响应与稳态电流质量, 在式(13)基础上引入与电流误差相关的零矢量偏置。考虑控制延迟补偿后, 定义补偿滑模变量为 $\boldsymbol{\sigma}_c(k)$, 其范数为:

$$r_c(k) = \|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| = \sqrt{\sigma_{\alpha c}^2(k) + \sigma_{\beta c}^2(k)} \quad (14)$$

零矢量偏置系数设计为:

$$\lambda_0(k) = \lambda_{\text{max}} e^{-\rho r_c(k)} \quad (15)$$

式中: λ_{max} 为最大零矢量偏置系数; ρ 为误差敏感因子。

最大偏置系数用于限制零矢量对评价函数的最大影响, 误差敏感因子用于调节偏置系数随电流误差增大时的衰减速度。参数整定时, 可先根据允许的稳态电流纹波确定最大偏置系数, 再结合稳态谐波和动态响应调整误差敏感因子。稳态纹波较大时可适当增大相关参数, 动态响应变慢时则适当减小。对于不同功率等级和滤波参数的系统, 相关参数原则上需要重新校核; 但采用标么化电流误差后, 可显著减弱系统容量变化对参数整定的影响。

进一步定义零矢量标志函数为:

$$Z_i = \begin{cases} 1, & \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_0, \mathbf{u}_7 \\ 0, & \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_6 \end{cases} \quad (16)$$

则修正后的评价函数为:

$$g_i(k) = g_{\text{eq}}(\mathbf{u}_i) - \lambda_0(k)Z_i \quad (17)$$

式(17)的第1项保证电流误差沿滑模趋近方向变化, 第2项提高小误差区域内零矢量的利用率。与固定惩罚系数相比, $\lambda_0(k)$ 能够随误差自适应变化, 从而兼顾动态响应与稳态纹波。

并网逆变器除需满足电流跟踪精度和谐波指标外, 还应降低开关损耗。若仅选择式(17)评价函数最小的电压矢量, 可能导致相邻采样周期内开关状态频繁变化。因此, 在滑模评价基础上引入开关变化次数二次筛选。

首先计算所有候选矢量中的最小评价价值:

$$g_{\min}(k) = \min_{u_i \in \vartheta} g_i(k) \quad (18)$$

构造滑模性能接近最优的候选集合:

$$\vartheta_c(k) = \{u_i \in \vartheta \mid g_i(k) \leq g_{\min}(k) + \varepsilon_g\} \quad (19)$$

式中: ε_g 为滑模性能容许裕度。该参数用于在保证滑模趋近性能基本不变的前提下,为降低开关频率提供可选矢量集合。

设第 i 个候选矢量对应的三相开关状态为 S_i , 上一周期实际作用的开关状态为 $S(k-1)$, 则候选矢量引起的开关变化次数可表示为:

$$N_i(k) = |S_i - S(k-1)| \quad (20)$$

最终在候选集合 $\vartheta_c(k)$ 中选择开关变化次数最少的电压矢量为:

$$u_{\text{opt}}(k) = \arg \min_{u_i \in \vartheta_c(k)} N_i(k) \quad (21)$$

若多个候选矢量具有相同的最小开关变化次数,则选择其中评价函数值最小的矢量。该方法无需额外设置多目标权重,可在保持电流控制性能的同时减少开关状态变化。无模型预测控制结构如图 3 所示。

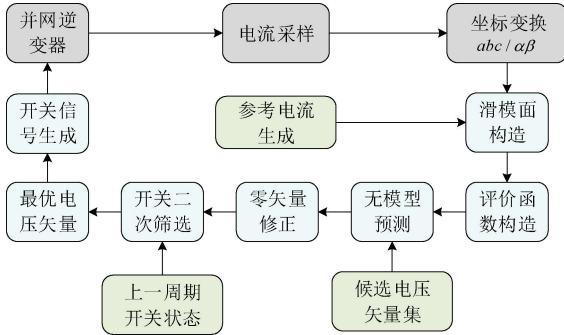


图 3 无模型预测控制结构

Fig. 3 Model-free predictive control structure

3 并网逆变器自适应事件触发机制设计

上述无模型评价函数能够降低参数依赖,但若仍在每个采样周期内执行完整寻优,稳态阶段将产生大量重复计算。由于稳态时相邻采样周期的电流误差变化较小,上一周期最优电压矢量在一定范围内仍继续使用。因此,引入自适应事件触发机制,将周期性寻优转化为按需寻优。

3.1 自适应阈值设计

定义基础事件触发阈值为 δ_0 , 其设计依据与上限推导参见文献[24]。为增强触发机制对不同运行工况的适应性,引入基于滑动窗口误差统计特征的自适应阈值。设当前时刻为 k , 窗口大小为 h , 窗口内 α 轴电流误差均值为:

$$\bar{\sigma}_\alpha(k) = \frac{1}{h} \sum_{m=0}^{h-1} \sigma_\alpha(k-m) \quad (22)$$

进一步可计算标准差以反映误差波动程度,其计算式为:

$$\sigma_{V\alpha}(k) = \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{m=0}^{h-1} [\sigma_\alpha(k-m) - \bar{\sigma}_\alpha(k)]^2} \quad (23)$$

β 轴误差标准差 $\sigma_{V\beta}(k)$ 可采用相同方式计算。根据误差标准差构造自适应触发阈值为:

$$\delta_{\text{adapt}}(k) = \delta_0 + a\sigma_V(k) \quad (24)$$

式中: a 为自适应增益,用于调节误差方差对触发阈值的影响程度。参数整定时应根据稳态电流质量、事件触发率及动态响应性能进行综合测试,折中选取。

为避免阈值过大导致误差失控,阈值过小导致频繁触发,对阈值进行限幅处理:

$$\delta_{\text{up}}(k) = \text{sat}[\delta_{\text{adapt}}(k), \delta_{\min}(k), \delta_{\max}(k)] \quad (25)$$

式中: $\delta_{\min}$ 和 $\delta_{\max}$ 分别为触发阈值的下限和上限。

该阈值可根据电流误差波动自适应调整,稳态时保持较高的跟踪精度,扰动或噪声增强时适当增大阈值,以减少误触发。

3.2 复合事件触发条件设计

第 1 个触发条件由电流误差是否超出自适应阈值决定。结合滑模面定义,可表示为:

$$e_1 = \begin{cases} 1, & \|\sigma_\alpha(k)\| > \delta_{\text{up}} \vee \|\sigma_\beta(k)\| > \delta_{\text{up}} \\ 0, & \|\sigma_\alpha(k)\| \leq \delta_{\text{up}} \wedge \|\sigma_\beta(k)\| \leq \delta_{\text{up}} \end{cases} \quad (26)$$

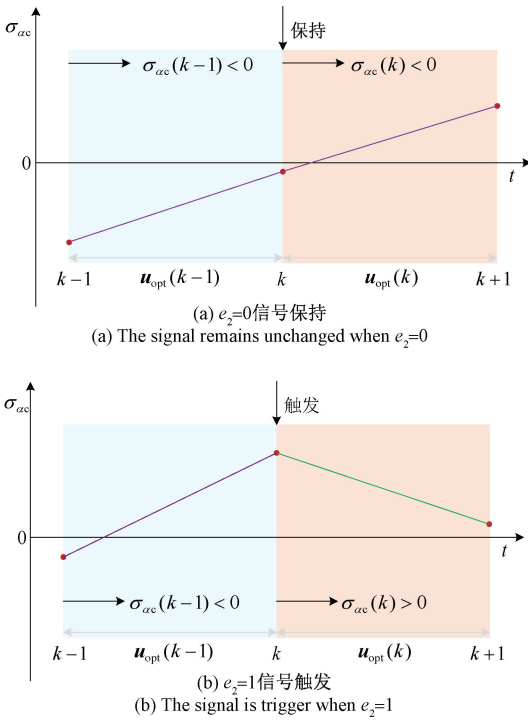
该条件限制了滑模面邻域内允许的电流误差。当任一轴误差超过自适应阈值时,说明当前电压矢量已难以满足跟踪要求,控制器立即重新寻优,使系统状态返回滑模面邻域。

仅依靠误差幅值阈值可能无法提前识别误差发散趋势。为保证滑模运动的存在性,进一步设置基于趋近方向的第 2 触发条件:

$$e_2 = \begin{cases} 1, & \text{sgn}[\sigma_\alpha(k)]S_\alpha(k-1) \geq 0 \vee \\ & \text{sgn}[\sigma_\beta(k)]S_\beta(k-1) \geq 0 \\ 0, & \text{sgn}[\sigma_\alpha(k)]S_\alpha(k-1) < 0 \wedge \\ & \text{sgn}[\sigma_\beta(k)]S_\beta(k-1) < 0 \end{cases} \quad (27)$$

e_2 触发条件用于判断上一周期电压矢量是否仍能使电流误差向滑模面收敛。当上一周期控制方向与当前误差方向相反时,系统继续保持原电压矢量;当二者方向相同时,表明误差可能发散,控制器立即重新寻优。两种状态分别如图 4(a) 和 (b) 所示。

电网电压突变也会改变并网电流的变化趋势。若仅依据电流误差触发,当电网状态已发生变化而电流误差尚未越界时,控制器可能无法及时更新电压矢量。因此,进一步引入电网电压扰动触发条件。

图4 e_2 触发条件判断Fig. 4 e_2 trigger condition judgment

定义电网电压幅值为:

$$U_g(k) = \sqrt{e_\alpha^2(k) + e_\beta^2(k)} \quad (28)$$

电网电压幅值变化量为:

$$\Delta U_g(k) = U_g(k) - U_g(k-1) \quad (29)$$

并网扰动触发条件定义为:

$$e_3 = \begin{cases} 1, & |\Delta U_g(k)| \geq \delta_U \\ 0, & |\Delta U_g(k)| < \delta_U \end{cases} \quad (30)$$

式中: δ_U 为电网电压幅值变化阈值。与直接采用 $\alpha\beta$ 电压矢量差相比,采用电压幅值变化量可避免正常工频旋转引起的误触发,增强系统的稳定性。

3.3 复合事件触发规则与稳定性分析

综合上述 3 类触发条件,最终复合触发条件为:

$$e(k) = e_1(k) \vee e_2(k) \vee e_3(k) \quad (31)$$

当 $e(k) = 1$ 时,控制器重新执行候选矢量评价和二次筛选,当 $e(k) = 0$ 时,控制器保持上一周期电压矢量状态,即:

$$\mathbf{u}(k) = \begin{cases} \mathbf{u}_{\text{opt}}(k), & e(k) = 1 \\ \mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1), & e(k) = 0 \end{cases} \quad (32)$$

由式(31)与(32)可知,所提机制并非单纯降低寻优频率,而是在电流误差越界、滑模趋近方向改变或电网电压突变时主动更新电压矢量,在稳态阶段保持原矢量。因此,该机制可在维持误差有界和滑模趋近性的同时减少重复寻优。

此外,所设计事件触发机制运行于离散采样控制系统中,触发条件仅在采样时刻进行判断,控制量更新也仅在离散周期内执行。因此,相邻两次事件触发之间的最小时间间隔不小于采样周期 T_s , 不存在连续时间事件触发系统中的 Zeno 现象。

为分析所提事件触发控制策略的稳定性,选取离散 Lyapunov 函数:

$$V(k) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_c^T(k) \boldsymbol{\sigma}_c(k) \quad (33)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_c(k)$ 为延迟补偿后的滑模变量。当 $e(k) = 1$ 时,控制器重新选择电压矢量。根据滑模评价函数的设计,理想条件下有:

$$\|\boldsymbol{\sigma}_c(k+1)\| \leq \kappa \|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\|, 0 < \kappa < 1 \quad (34)$$

式中: κ 为滑模误差收缩系数,用于表征相邻采样周期内滑模误差的衰减程度。实际应用中, κ 可由事件触发后相邻采样周期滑模变量范数比值的上界确定。

考虑采样噪声、离散化误差和基于查表法 (look-up table, LUT) 的延迟补偿误差,将其综合影响记为 $\boldsymbol{\omega}(k)$, 并假设为:

$$\|\boldsymbol{\omega}(k)\| \leq \varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_d + \varepsilon_{\text{LUT}} \quad (35)$$

式中: ε 为综合误差上界, ε_n 、 ε_d 和 ε_{LUT} 分别表示采样噪声、离散化误差和 LUT 延迟补偿误差的上界。因此,实际补偿滑模变量满足:

$$\|\boldsymbol{\sigma}_c(k+1)\| \leq \kappa \|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| + \varepsilon \quad (36)$$

由此可得 Lyapunov 函数差分为:

$$\Delta V(k) \leq -\frac{1-\kappa^2}{2} \|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\|^2 + \kappa \varepsilon \|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| + \frac{\varepsilon^2}{2} \quad (37)$$

当 $\|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| > \frac{\varepsilon}{1-\kappa}$ 时,有 $\Delta V(k) < 0$ 。因此,在

事件触发状态下,补偿滑模变量将逐步收敛,并最终进入由 ε 和 κ 共同决定的有界邻域,即:

$$\|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| \leq \frac{\varepsilon}{1-\kappa} \quad (38)$$

当 $e(k) = 0$ 时,误差触发条件和滑模趋近方向触发条件均未被激活,说明电流误差仍处于自适应阈值允许范围内,且保持上一周期电压矢量不会使误差持续发散。结合阈值限幅条件,则有:

$$\|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| \leq \sqrt{2} \delta_{\max} + \varepsilon \quad (39)$$

综合事件触发与非触发两种状态,闭环补偿滑模误差最终满足:

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{\sigma}_c(k)\| \leq \max \left\{ \frac{\varepsilon}{1-\kappa}, \sqrt{2} \delta_{\max} + \varepsilon \right\} \quad (40)$$

由此可知,在综合误差有界、滑模误差收缩系数满足 $0 < \kappa < 1$, 且自适应触发阈值满足系统允许电流误差约束的条件下,所提控制策略能够保证闭环补偿滑模误差

一致最终有界。其中, ε_n 、 ε_d 和 ε_{LUT} 可分别依据采样精度、离散化截断误差及 LUT 增量估计残差确定; 阈值下限 $\delta_{\min}$ 应高于采样噪声上界 ε_n , 以避免频繁误触发; 阈值上限 $\delta_{\max}$ 应满足系统允许的最大电流误差要求; 遗忘因子 η 则应在 LUT 增量估计的噪声抑制能力与动态跟踪速度之间进行折中选取。

4 基于查表法的改进延迟补偿方法

4.1 控制延迟的影响

事件触发机制能够减少冗余寻优, 但采样、计算和 PWM 更新产生的控制延迟仍会使控制器使用的电流状态与电压矢量实际作用时刻不一致。通常, k 时刻计算得到的电压矢量在下一采样周期才生效, 导致预测轨迹偏离实际轨迹。若不补偿, 该偏差会在控制周期中累积, 使系统动态响应变慢、稳态纹波增大以及谐波含量上升。计算延迟对预测电流的影响如图 5 所示。

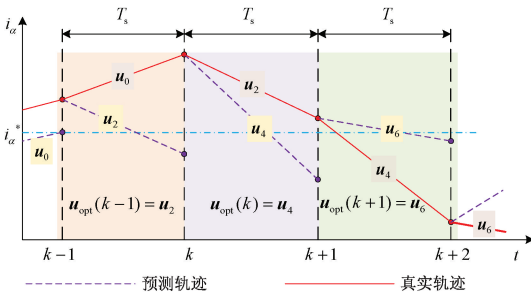


图 5 计算延迟对预测电流的影响

Fig. 5 Impact of the control delay on current prediction

4.2 改进的延迟补偿方法

为补偿控制延迟, 提出一种基于电流增量 LUT 的改进延迟补偿方法。该方法根据历史采样数据建立电压矢量与电流增量之间的对应关系, 并通过递推更新平滑增量估计值。在控制决策前, 利用查表得到的电流增量外推电压矢量实际作用时刻的电流状态, 从而修正控制器所依据的初始状态。具体延迟补偿流程如图 6 所示。

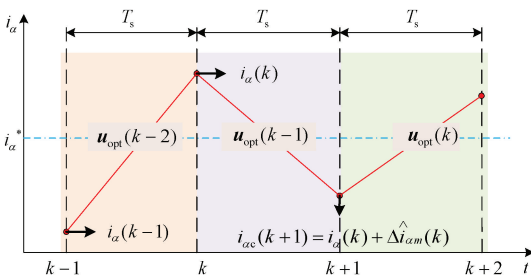


图 6 延迟补偿过程

Fig. 6 Delay compensation process

在 k 时刻过去两个周期 α 轴的电流为 $i_\alpha(k-1)$ 与 $i_\alpha(k)$; 对应的电压矢量分别为 $\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-2)$ 和 $\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1)$ 。在采样周期足够短的条件下, 电流增量 Δi_α 可用于表征相应电压矢量对电流的实际作用效果, 其计算式为:

$$\Delta i_\alpha(\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-2)) = i_\alpha(k) - i_\alpha(k-1) \quad (41)$$

通过式 (41) 可获得不同电压矢量对应的 α 轴电流增量 Δi_α , 并将其写入 LUT; 类似地, β 轴电流增量 Δi_β 也可通过相同方式计算和存储。假设当前周期 k 应用的电压向量为 $\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1)$, 则校正后的 α 轴电流 $i_{\alpha c}(k+1)$ 通过外推计算为:

$$i_{\alpha c}(k+1) = i_\alpha(k) + \Delta i_\alpha(\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1)) \quad (42)$$

式中: $\Delta i_\alpha(\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1))$ 从 LUT 中读取, 表示 $\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1)$ 在周期 k 引起的电流变化。

然而, 在高频控制系统中, 单个采样周期内的电流变化量较小, 差分计算易放大传感器噪声及模数转换误差。若直接采用瞬时电流增量进行补偿, 可能引入滑模变量估计偏差, 进而降低事件触发判断和电压矢量选择的准确性。

因此, 为抑制瞬时差分噪声, 引入遗忘因子对 LUT 表的更新策略进行改进, 从而将 LUT 从一个存储单次观测值的静态表转变为递推更新的平滑估计表。将 8 个基本电压矢量 $\mathbf{u}_m$ 中的每一个分别定义其在 α 轴和 β 轴的平滑电流增量估计值, 记为 $\widehat{\Delta i}_{\alpha m}(k)$ 与 $\widehat{\Delta i}_{\beta m}(k)$ 。当矢量 $\mathbf{u}_m$ 在 $(k-2)$ 时刻被应用, 并在 k 时刻获得其对应的瞬时电流增量观测值 $\Delta i_{\alpha m}^{\text{inst}}(k)$ 与 $\Delta i_{\beta m}^{\text{inst}}(k)$ 。随后采用如下带遗忘因子的指数加权移动平均更新律:

$$\begin{cases} \widehat{\Delta i}_{\alpha m}(k) = \eta \widehat{\Delta i}_{\alpha m}(k-1) + (1-\eta) \Delta i_{\alpha m}^{\text{inst}}(k) \\ \widehat{\Delta i}_{\beta m}(k) = \eta \widehat{\Delta i}_{\beta m}(k-1) + (1-\eta) \Delta i_{\beta m}^{\text{inst}}(k) \end{cases} \quad (43)$$

式中: η 为遗忘因子, 满足 $0 < \eta < 1$ 。参数 η 的取值决定了系统的“记忆”特性, 当取值接近 1 时, 系统具有强记忆。更新主要依赖历史数据, 对新观测值中的噪声不敏感, 抗干扰能力强, 但跟踪系统真实动态变化的速度较慢。当取值接近 0 时, 系统快遗忘。更新迅速跟踪最新观测, 动态响应快, 但抑制噪声能力弱。通过调整 η , 可在噪声抑制与动态跟踪之间实现最优权衡, 有效平滑随机采样噪声。

以 α 轴为例, 基于 k 时刻应用的矢量 $\mathbf{u}_{\text{opt}}(k-1)$, 从 LUT 中读取其平滑增量估计值 $\widehat{\Delta i}_{\alpha m}(k)$ 计算 $k+1$ 时刻补偿后的电流预测值为:

$$i_{\alpha c}(k+1) = i_\alpha(k) + \widehat{\Delta i}_{\alpha m}(k) \quad (44)$$

进一步将校正值作为周期 $k+1$ 的预测电流, 用于控制决策。因此, 补偿后滑模面可重新定义为:

$$\sigma_c(k+1) = i_c(k+1) - i_c^*(k+1) \quad (45)$$

式中: $\mathbf{i}_c(k+1)=[i_{ac}(k+1),i_{bc}(k+1)]^T$ 为校正后的 $\alpha\beta$ 轴电流向量。

由此,控制器在寻优时不再直接基于滞后的采样电流,而是基于矢量实际生效时刻的外推电流状态,从而削弱控制延迟对预测决策的影响。该补偿电流同时服务于事件触发判断和电压矢量评价,使所提控制策略形成状态补偿、按需寻优与无模型矢量选择相互配合的实时控制链。整体控制结构如图 7 所示。

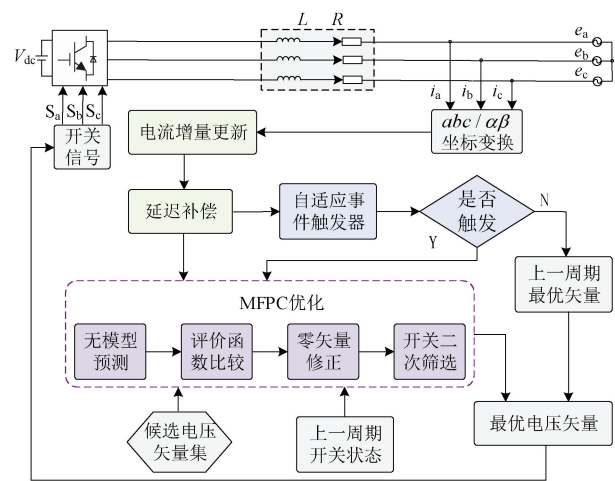


图 7 整体控制结构
Fig. 7 Overall control structure

5 仿真对比验证

为验证所提出的自适应事件触发无模型预测控制策略 (adaptive event-triggered model-free predictive control, AET-MFPC) 的可行性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型进行分析。仿真与实验参数如表 1 所示。直流侧电压取 700 V,可满足 380 V 电网并网所需的电压裕度;滤波电感取 5 mH,用于限制电流纹波并兼顾动态响应;采样周期取 20 μs,对应 50 kHz 采样频率,可满足 10 kHz 开关频率下的实时控制要求。事件触发阈值根据允许电流误差和触发频率折中选取,滑动窗口用于平滑误差波动,自适应增益用于避免阈值剧烈变化;电网电压扰动阈值设置为高于正常采样噪声和电压微小波动的水平,以减少误触发;LUT 遗忘因子取 0.9,用于在噪声抑制和动态跟踪之间取得平衡。

通过稳态并网、电感参数失配和电网扰动等工况,将所提方法与 FCS-MPC 方法、基于电流差的无模型预测控制方法 (current-difference-based model-free predictive control, CD-MFPC) 进行对比,验证所提方法在稳态电流质量、参数鲁棒性和电网扰动适应性方面的控制性能。

表 1 仿真与实验参数
Table 1 Simulation and experimental parameters

参数	数值
直流电压 V_{dc}/V	700
电网电压有效值 e/V	380
电网基频 f/Hz	50
参考电流 i_{ref}/A	20
滤波电感 L/H	0.005
等效电阻 R/Ω	0.5
采样周期 $T_s/\mu s$	20
滑动窗口大小 h	10
自适应阈值增益 a	0.3
触发阈值下限 δ_{min}/A	0.1
触发阈值上限 δ_{max}/A	0.6
电网电压扰动阈值 δ_U/V	10
LUT 遗忘因子 η	0.9

5.1 稳态对比验证

3 种方法在稳态工况下的网侧电流与电网电压波形如图 8 所示。由图中波形可知,3 种方法均能稳定跟踪参考电流,且未出现明显振荡。所提方法在减少周期性寻优后仍保持良好的电流正弦度,验证了事件触发机制与无模型矢量评价方法的可行性。

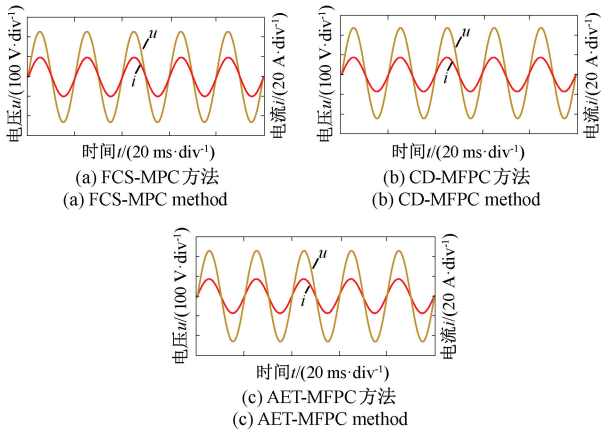


图 8 稳态并网电流和电网电压
Fig. 8 Steady-state grid-connected current and grid voltage

5.2 参数扰动对比验证

由于电感增大,滤波作用增强,系统电流纹波和谐波含量可能自然降低,难以充分体现参数失配对预测模型和电压矢量选择的不利影响。因此,设置滤波电感减小至标称值一半的参数失配工况,并对 3 种控制方法的并网电流波形和电流总谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 进行比较,结果如图 9 所示。

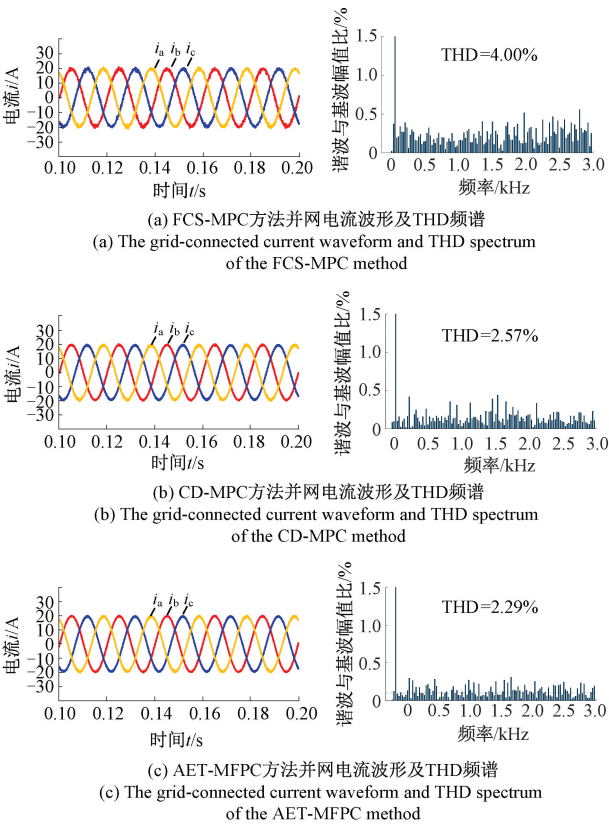


图 9 $L/L_0 = 0.5$ 时的并网电流及 FFT 分析结果
Fig. 9 The grid-connected current and FFT analysis results
when $L/L_0 = 0.5$

由图 9 可知, FCS-MPC、CD-MFPC 和 AET-MFPC 的并网电流 THD 分别为 4.00%、2.57% 和 2.29%。所提方法较 FCS-MPC 和 CD-MFPC 分别降低 42.75% 和 10.89%。FCS-MPC 受电感失配影响较大, CD-MFPC 通过电流差分减弱了参数依赖; 所提方法结合滑模趋近评价、零矢量偏置和二次筛选, 进一步降低了电流畸变, 表现出更强的参数鲁棒性。

电感参数失配 $L_0/L = 0.5$ 时 3 种控制方法的 α 轴电流跟踪误差对比如图 10 所示。可以看出, 滤波电感偏离标称值后, FCS-MPC 的电流误差波动明显增大, 表明参数失配降低了预测模型的准确性, 使实际电流响应与预测结果产生偏差。CD-MFPC 的误差幅值较 FCS-MPC 有所减小, 说明无模型预测控制能够在一定程度上增强系统对参数变化的适应能力。相比之下, 所提 AET-MFPC 的电流跟踪误差更小、波动范围更集中, 表明其在参数失配条件下具有更好的误差收敛性能。

5.3 电网扰动仿真验证

为验证所提方法对电网电压扰动的适应能力, 设置 20% 和 30% 电压跌落工况, 结果如图 11 所示。

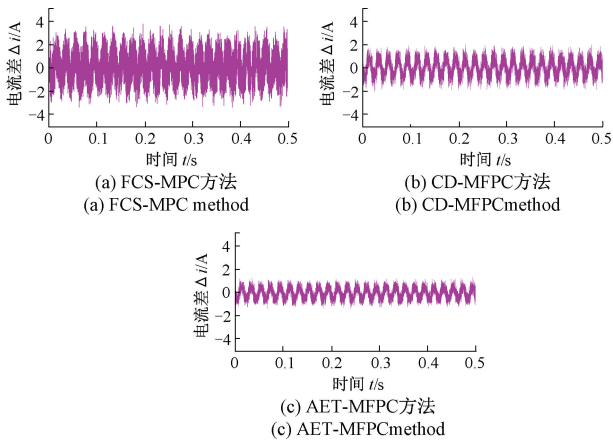


图 10 $L/L_0 = 0.5$ 时 α 轴电流跟踪误差
Fig. 10 The current tracking error of the α axis
when $L/L_0 = 0.5$

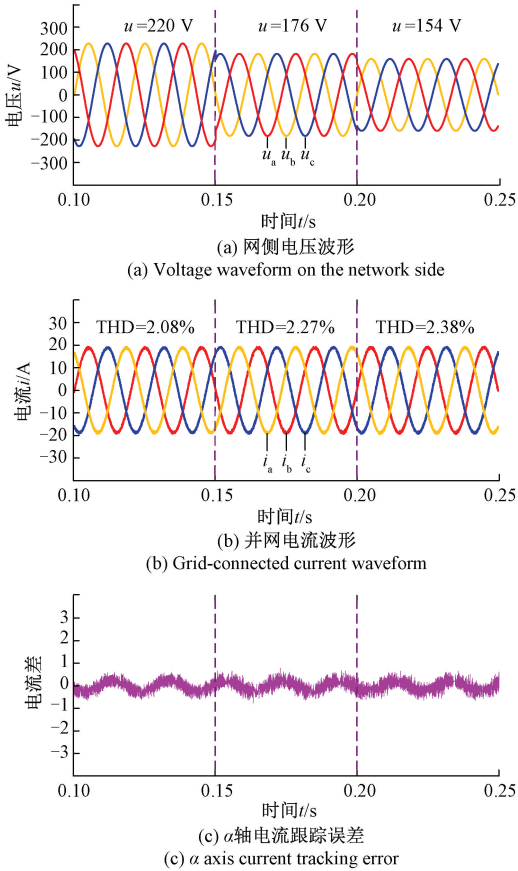


图 11 电网电压跌落下的并网电流响应及跟踪误差
Fig. 11 The grid voltage drop-induced grid-connected
current response and tracking error

由图 11 可知, 在 $t = 0.15\text{ s}$ 和 $t = 0.2\text{ s}$ 时电网电压分别发生 20% 和 30% 跌落, 三相并网电流在电压跌落时能够保持稳定正弦运行, 未出现明显振荡、发散或过流现

象。随着电压跌落程度加深,并网电流 THD 由正常工况下的 2.08% 分别增大至 2.27% 和 2.38%,但整体仍处于较低水平,说明电网电压扰动仅使电流谐波含量小幅增加。图 11(c) 中电流误差波形进一步表明,跌落前后 α 轴电流误差始终被约束在较小范围内,在两个跌落时刻未出现持续偏移或明显放大。上述结果说明,所提控制方法能够在电网电压跌落工况下及时调整电压矢量,抑制电网扰动对并网电流质量和跟踪精度的影响,具有较好的扰动适应能力。

为进一步验证所提方法在复杂电网条件下的运行性能,设置 3 种典型工况:电网电压不平衡、背景谐波和弱电网阻抗变化。其中,电压不平衡工况通过将 A 相电压幅值降低,使负序电压与正序电压之比约为 5%;背景谐波工况在电网电压中叠加 3% 和 2% 的 5 次、7 次谐波;弱电网工况则通过增大网侧等效阻抗至标称值的 2 倍模拟电网强度降低。3 种工况下的并网电流波形及频谱如图 12 所示。结果表明,各工况下三相并网电流均能保持稳定运行,THD 分别为 2.18%、2.30% 和 2.22%,说明所提方法对电压不平衡、背景谐波及网侧阻抗变化具有良好的适应能力。

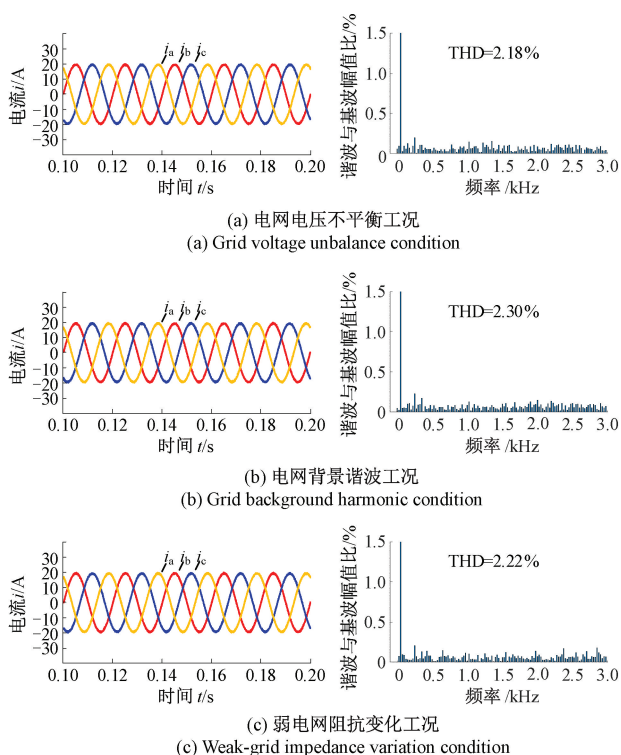


图 12 复杂电网工况下的并网电流波形及频谱

Fig. 12 Grid-connected current waveforms and spectra under complex grid conditions

6 实验验证

为验证所提 AET-MFPC 在实际控制平台中的可行性和工程应用价值,搭建如图 13 所示的实验平台进行验证。其中,控制算法由 YXSPACE-SP2000 快速原型控制器实现,主电路参数与仿真参数保持一致。实验内容主要包括稳态对比实验、扰动对比实验、动态对比实验、延迟补偿实验以及事件触发计算量对比实验。

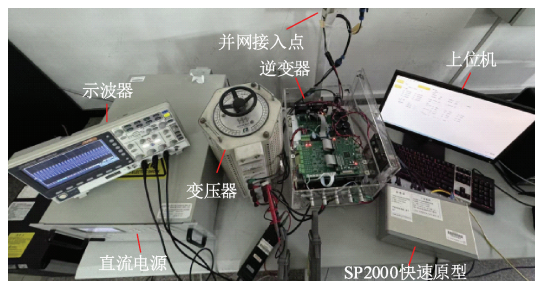


图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

为精简实验观测内容,综合实验室实际条件与数据有效性,选取具有代表性的 a、b 两相电流波形进行分析。由于三相三线制并网逆变器在对称运行时满足 $i_a + i_b + i_c = 0$, 两相电流能够表征三相电流的变化规律,并可反映系统的稳态电流质量与动态响应性能。

6.1 稳态对比实验

在稳态工况下 FCS-MPC、CD-MFPC 和所提 AET-MFPC 3 种方法的并网电流波形如图 14 所示。其中, FCS-MPC、CD-MFPC 和所提 AET-MFPC 的并网电流 THD 分别为 2.47%、2.63% 和 2.39%。其中, CD-MFPC 的 THD 略高于 FCS-MPC,主要是由于两种方法获取电流变化信息的方式不同。在参数匹配的稳态工况下, FCS-MPC 所采用的离散模型能够较准确地预测候选电压矢量作用下的电流变化;而 CD-MFPC 利用相邻采样周期的实测电流差估计电压矢量响应,稳态时单周期电流增量较小,容易受到采样噪声、量化误差和开关纹波影响,且差分运算会进一步放大高频扰动。同时,历史电流增量与当前电网电压相位及运行状态可能存在偏差,从而降低矢量评价精度,导致电压矢量选择波动和电流纹波增加。因此,在参数准确的稳态工况下, CD-MFPC 的无模型优势尚未充分体现,其 THD 略高于 FCS-MPC。

针对上述问题,可采用递推滤波或滑动平均对电流增量进行平滑更新,并结合电网电压相位分类存储、零矢量偏置和开关变化次数约束,减小差分噪声及矢量切换波动。所提 AET-MFPC 通过滑模趋近评价、误差相关零

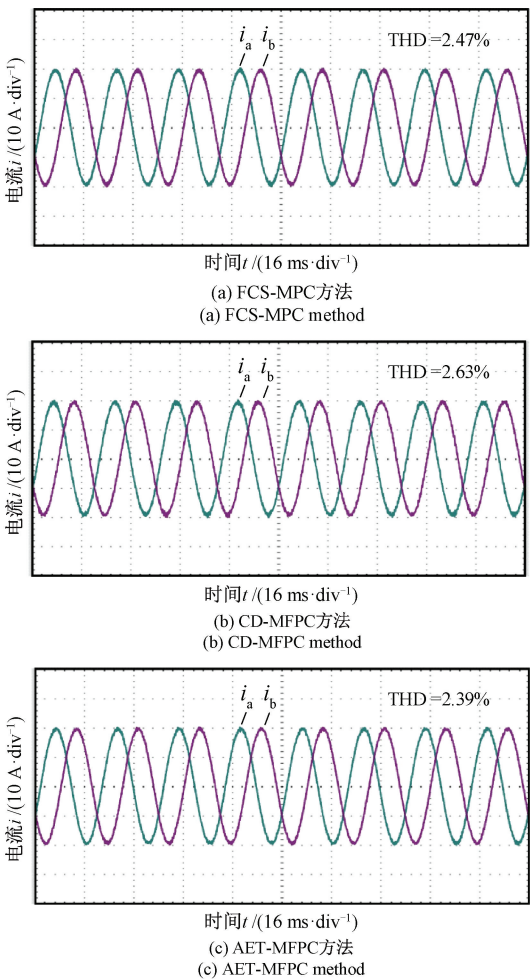


图 14 3 种方法稳态并网电流

Fig. 14 Three methods for steady-state grid-connected current

矢量偏置和开关状态二次筛选抑制小误差区域内的电流波动,使并网电流 THD 降低至 2.39%,较 FCS-MPC 和 CD-MFPC 分别降低 3.24% 和 9.13%,表现出更优的稳态电流质量。

6.2 扰动对比实验

滤波电感参数失配时,3 种控制方法的并网电流波形如图 15 所示。其中,3 种控制方法均能维持并网电流基本正弦,但电流质量存在明显差异。FCS-MPC 由于依赖标称电感参数进行模型预测,当实际电感与控制参数不一致时,预测电流与实际电流之间产生偏差,导致最优电压矢量选择准确性下降,电流 THD 达到 4.49%。CD-MFPC 利用电流差分信息替代精确模型预测,降低了对电感参数的依赖,因此并网电流 THD 降低至 3.30%,相比 FCS-MPC 具有更好的参数适应能力。所提 AET-MFPC 在无模型预测的基础上进一步改进控制结构,使电流误差在参数扰动下仍能保持较好的收敛特性,THD

进一步降低至 2.79%。实验结果表明,所提方法在电感参数失配条件下能够有效抑制并网电流畸变,提高系统对滤波参数变化的鲁棒性。

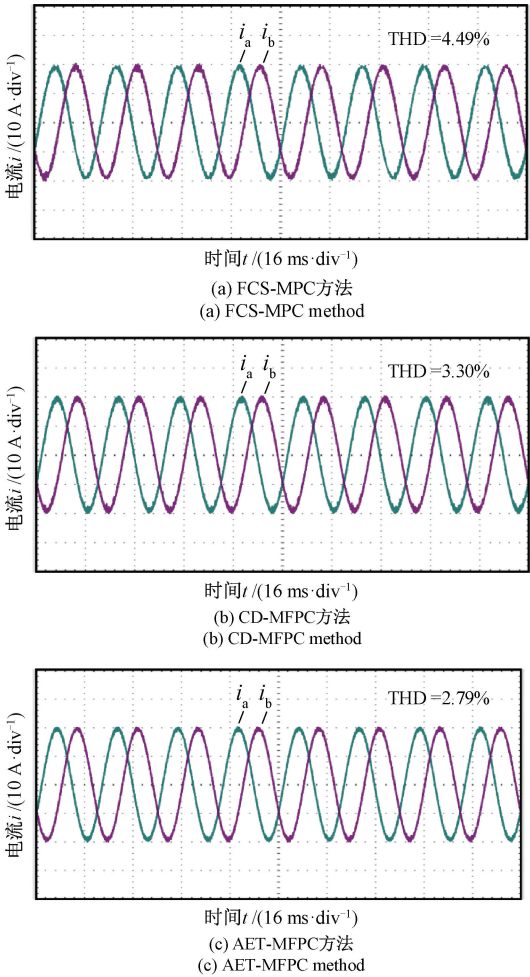
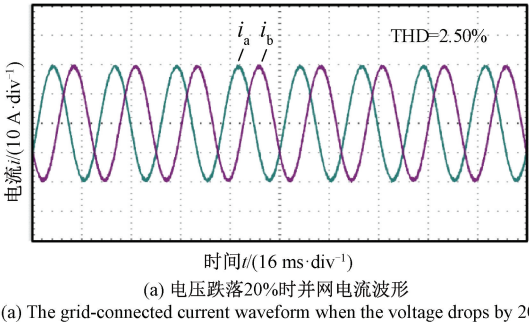


图 15 3 种方法 $L/L_0 = 0.5$ 时并网电流

Fig. 15 Three Methods for Grid-Connected Current at $L/L_0 = 0.5$

为进一步验证所提控制方法在电网电压扰动下的运行性能,开展不同程度电网电压跌落实验,实验结果如图 16 所示。电网电压分别跌落 20% 和 30% 时,三相并网电流均能保持稳定运行,电流波形未出现明显振



(a) The grid-connected current waveform when the voltage drops by 20%

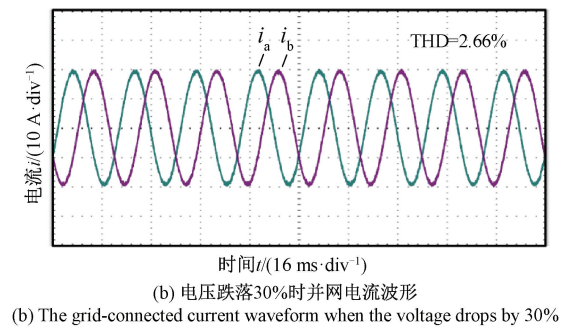


图 16 电压跌落时的并网电流波形

Fig. 16 Grid-connected current waveforms under grid voltage sag

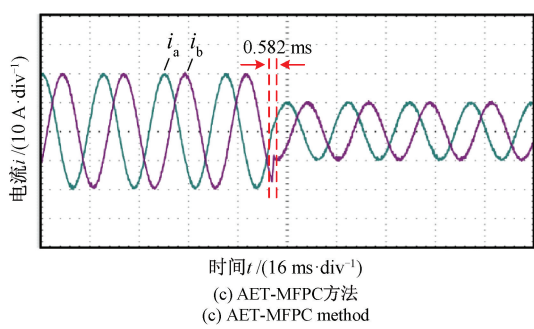


图 17 3 种方法动态电流响应

Fig. 17 Three methods for dynamic current response

荡和畸变,其 THD 分别为 2.50% 和 2.66%。随着电压跌落程度增大,并网电流谐波含量略有上升,但仍保持在较低水平,表明所提方法能够在电网电压幅值发生较大变化时及时调整电压矢量,维持较好的电流跟踪性能和并网电流质量,验证了其对电网电压扰动的适应能力。

6.3 动态对比实验

3 种控制方法在参考电流由 20 A 突变为 10 A 时的动态响应实验波形如图 17 所示。其中,FCS-MPC、CD-MFPC 和 AET-MFPC 的电流调节时间分别为 1.096、0.813 和 0.582 ms。所提方法较 FCS-MPC 和 CD-MFPC 分别缩短 46.90% 和 28.41%,且过渡过程平稳,表明其具有更快的动态响应和误差收敛速度。

6.4 延迟补偿对比实验

无延迟补偿、两步预测补偿及所提延迟补偿方法下

的并网电流实验波形如图 18 所示。

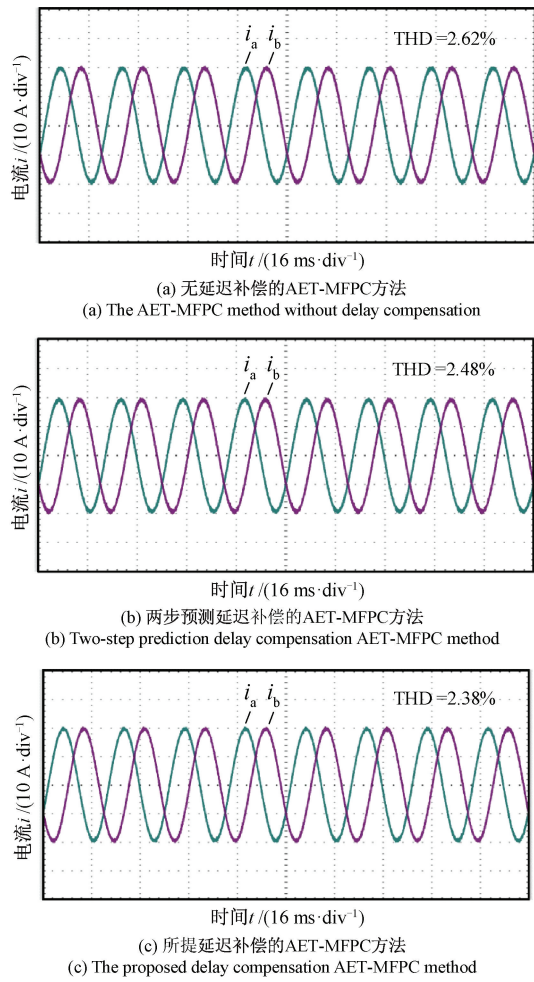
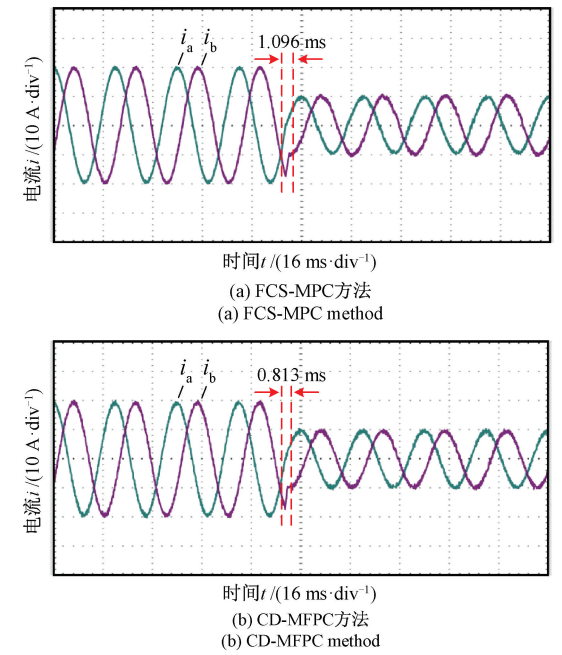


图 18 延迟补偿对比

Fig. 18 Delay compensation comparison

3 种方法对应的电流 THD 分别为 2.62%、2.48% 和 2.38%。相比无延迟补偿方法,两步预测补偿和所提补偿方法分别将 THD 降低 5.34% 和 9.16%,且所提方法下电流波形更加平滑。结果表明,所提 LUT 电流增量延迟



补偿方法能够有效减小采样、计算及 PWM 更新延迟引起的控制偏差,进一步提升并网电流质量。

6.5 开关频率与损耗对比实验

为验证开关状态二次筛选对开关损耗的改善效果,分别关闭和启用二次筛选环节,对三相桥臂开关脉冲及功率器件开关过程进行测量。实验中统计 0.2 s 内三相桥臂开关状态的变化次数,得到等效开关频率;通过对开通、关断瞬态功率积分获得单次开关能量,并结合实际开关频率计算总开关损耗。测试结果如表 2 所示。

表 2 开关状态二次筛选前后的开关频率及损耗对比
Table 2 Comparison of switching frequency and power losses with and without secondary switching state screening

控制方法	平均开关频率/kHz	总开关损耗/W	电流 THD/%
无二次筛选	8.62	96.8	2.37
二次筛选	7.51	85.1	2.39

由表 2 可知,未采用开关状态二次筛选时,逆变器等效平均开关频率为 8.62 kHz;加入二次筛选后,平均开关频率降低至 7.51 kHz,降幅为 12.88%。相应地,功率器件总开关损耗由 96.8 W 降低至 85.1 W,降幅为 12.09%。采用二次筛选前后的并网电流 THD 分别为 2.37% 和 2.39%,仅增加 0.02 个百分点,说明开关状态二次筛选能够在基本不影响并网电流质量的前提下,有效降低开关频率和开关损耗。

6.6 事件触发计算量对比实验

为验证所提 AET-MFPC 在稳态时对在线寻优次数的降低效果,在控制器平台上进行统计,其结果如表 3 所示。实验统计时间为 0.2 s,总采样次数为 10 000 次。

表 3 3 种方法在线寻优次数对比
Table 3 Comparison of the number of online optimization attempts for the three methods

控制方法	总采样次数	实际寻优次数	触发率/%
FCS-MPC	10 000	10 000	100
CD-MFPC	10 000	10 000	100
AET-MFPC	10 000	3 946	39.46

由表 3 数据可知,FCS-MPC 和 CD-MFPC 均采用周期性寻优方式,每个采样周期都执行一次完整的候选电压矢量评价与最优矢量选择,因此实际寻优次数均为 10 000 次。所提 AET-MFPC 仅在电流误差越界、滑模趋近方向受破坏或电网电压扰动时重新执行寻优,实验统计得到实际寻优次数为 3 946 次,触发率为 39.46%,在线寻优次数较周期性寻优方法减少 60.54%。结果表明,所提事

件触发机制能够有效避免稳态阶段不必要的重复优化。

此外,测量 3 种控制方法程序执行时间,结果如表 4 所示。由实验结果可知,FCS-MPC 和 CD-MFPC 在每个采样周期内均执行完整寻优,平均执行时间分别为 13.62 和 12.94 μs 。所提 AET-MFPC 在事件触发周期内需要额外完成自适应阈值更新、复合事件判断、LUT 电流增量更新、延迟补偿和二次筛选,因此触发周期执行时间为 15.08 μs ,略高于 FCS-MPC;但在未触发周期内,仅需进行触发条件判断并保持上一周期电压矢量,执行时间为 7.36 μs 。结合 39.46% 的触发率,所提方法平均执行时间为 10.41 μs ,较 FCS-MPC 降低 23.57%。该结果说明,所提方法并非通过降低单次完整寻优时间来减少计算量,而是通过减少完整寻优次数降低平均计算负担。

表 4 3 种方法程序执行时间对比
Table 4 Comparison of program execution times for three methods (μs)

控制方法	触发周期 执行时间	未触发周期 执行时间	平均执行 时间
FCS-MPC	13.62	0	13.62
CD-MFPC	12.94	0	12.94
AET-MFPC	15.08	7.36	10.41

为进一步分析事件触发机制在不同工况下的响应特性,统计稳态运行、参考电流由 20 A 突变至 10 A、滤波电感减小至标称值的 50% 以及电网电压跌落 30% 时的触发率,结果如表 5 所示。其分别为 39.46%、63.18%、57.72% 和 68.26%。稳态时电流误差较小,控制器主要保持上一周期电压矢量,可减少 60.54% 的在线寻优次数;当参考电流、电感参数或电网电压发生突变时,电流误差及滑模趋近方向迅速变化,使触发率相应提高,其中电网电压跌落 30% 时触发率最高。扰动消失且电流重新稳定后,触发频率逐渐恢复至稳态水平,表明所提机制能够根据运行状态自适应调整寻优频率,在降低稳态计算量的同时保证动态和扰动工况下的控制性能。

表 5 不同运行工况下的事件触发率
Table 5 Event trigger rate under different operating conditions

运行工况	触发率/%
稳态运行	39.46
参考电流由 20 A 突变至 10 A	63.18
滤波电感减小至标称值的 50%	57.72
电网电压跌落 30%	68.26

为分析事件触发参数对控制性能的影响,在其他参数保持不变的条件下,分别改变自适应阈值增益、触发阈

值上下限及电网电压扰动阈值,并统计并网电流 THD 和事件触发率,结果如表 6 所示。

表 6 事件触发参数敏感性分析

Table 6 Sensitivity analysis of event-triggered parameters			
参数变化	参数取值	THD/%	触发率/%
α 减小	0.15	2.34	44.72
α 增大	0.45	2.45	35.83
$\delta_{\min}$ 减小	0.05 A	2.32	45.61
$\delta_{\min}$ 增大	0.15 A	2.47	34.96
$\delta_{\max}$ 减小	0.40 A	2.35	43.28
$\delta_{\max}$ 增大	0.80 A	2.51	34.17
δ_U 减小	5 V	2.38	42.36
δ_U 增大	15 V	2.41	37.24

由表 6 可知,减小自适应阈值增益或触发阈值时,事件触发条件对误差变化更加敏感,事件触发率随之提高,并网电流 THD 略有降低;增大上述参数能够减少在线寻优次数,但会扩大非触发区域,使 THD 略有上升。电网电压扰动阈值对稳态电流质量的影响相对较小,但阈值过小容易因正常电压波动产生额外触发,阈值过大则会降低对电网扰动的检测灵敏度。综合并网电流质量与计算量,表 1 所选参数能够取得较好的折中效果,且参数在一定范围内变化时系统均能保持稳定运行,说明所选参数具有较好的工况适配性。

7 结 论

针对新能源并网逆变器 FCS-MPC 存在的模型参数敏感、周期性寻优计算负担较大以及数字控制延迟影响电流质量等问题,提出一种自适应事件触发无模型预测控制策略,主要结论如下:

1) 基于滑模趋近方向构造无模型电压矢量评价函数,并结合误差相关零矢量偏置和开关状态二次筛选,降低了控制器对电阻、电感等模型参数的依赖。当滤波电感突减时,所提方法的实验电流 THD 为 2.79%,较 FCS-MPC 和 CD-MFPC 分别降低 37.86% 和 15.45%;参考电流突变时,调节时间分别缩短 46.90% 和 28.41%,表明所提方法能够兼顾参数鲁棒性、稳态电流质量与动态响应性能。

2) 所设计的复合事件触发机制根据电流误差、滑模趋近方向和电网电压变化按需执行电压矢量寻优。稳态运行时,在线寻优次数减少 60.54%,平均执行时间降至 10.41 μ s,较 FCS-MPC 和 CD-MFPC 分别降低 23.57% 和 19.55%。在参考电流突变、参数失配和电网扰动时,触

发频率能够自适应提高,实现了稳态计算效率与动态控制性能之间的协调。

3) 基于 LUT 电流增量的延迟补偿方法能够外推电压矢量实际作用时刻的电流状态,减小采样、计算及 PWM 更新引起的控制偏差。加入延迟补偿后,并网电流 THD 由 2.62% 降至 2.38%,降幅为 9.16%。在电网电压跌落、不平衡、背景谐波和弱电网阻抗变化等工况下,系统均保持稳定运行,验证了所提方法对数字延迟及复杂电网扰动的适应能力。

所提方法在参数鲁棒性、动态响应、计算效率和延迟补偿性能方面均取得了明显改善。后续可重点研究事件触发阈值与 LUT 遗忘因子的自适应整定,进一步提高不同运行工况下的控制性能。

参考文献

[1] 王文心,王建军,陈波,等. 基于激光雷达的风电叶片实时变形测量及分析[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(2): 222-234.
Wang Wenxin, Wang Jianjun, Chen Bo, et al. LiDAR-based wind turbine blade realtime deformation measurement and analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2026, 47(2): 222-234.

[2] Shao C Y, Yu H X, Zhang L K, et al. Data-driven co-optimization of blade selection and sequencing for aeroengine rotors under industrial assembly constraints[J]. Instrumentation, 2025, 12(4): 1-14.

[3] 陶慧,王坤. 双幕次滑模控制单相三电平逆变器非线性行为[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 228-236.
Tao Hui, Wang Kun. Nonlinear behavior of single-phase three-level inverter with double power sliding mode control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 228-236.

[4] 王震,杨明,孙杭. 弱电网下基于电流环与锁相环耦合效应的并网逆变器阻抗重塑控制策略[J]. 电子测量技术, 2026, 49(5): 9-18.
Wang Zhen, Yang Ming, Sun Hang. Grid-connected inverter impedance reshaping control strategy based on the coupling effect of current loop and phase-locked loop in the power grid[J]. Electronic Measurement Technology, 2026, 49(5): 9-18.

[5] 刘春喜,蔡磊,李世纪,等. 并网逆变器自适应滑模无模型预测控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(1): 389-402.
Liu Chunxi, Cai Lei, Li Shiji, et al. Adaptive sliding mode model-free predictive control strategy for grid-connected inverters[J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2026, 47(1): 389-402.
- [6] 马炳图, 杜钦君, 张婷, 等. 基于 HBF 神经网络观测器的 PMSM 无模型预测电流控制[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 376-386.
- Ma Bingtu, Du Qinqun, Zhang Ting, et al. PMSM model-free based on HBF neural network observerpredictive current control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 376-386.
- [7] 马幼捷, 白鑫, 周雪松, 等. 基于优化算法自抗扰与柔性模型预测的协同稳压控制[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(12): 5101-5111.
- Ma Youjie, Bai Xin, Zhou Xuesong, et al. Coordinated voltage stabilization control of optimized algorithm-based active disturbance rejection and flexible model predictive control[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(12): 5101-5111.
- [8] Chakraborty S, Sarkar K, Maiti D, et al. A single-phase grid-tied transformer-less multilevel solar inverter with voltage boost [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(1): 379-389.
- [9] 郭潇镁, 李永刚, 周一辰. 基于变权重自适应模型预测控制的虚拟同步发电机调频策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(21): 6956-6969.
- Guo Xiaomei, Li Yonggang, Zhou Yichen. Virtual synchronous generator frequency regulation controlstrategy based on variable weight adaptive model predictive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(21): 6956-6969.
- [10] Lin X P, Liu J X, Liu Z, et al. Model-free current predictive control for PMSMs with ultra-local model employing fixed-time observer and extremum-seeking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(8): 10682-10693.
- [11] 孙振耀, 徐帅, 任冠州, 等. 永磁同步牵引电机全速域双模式模型预测控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 748-758.
- Sun Zhenyao, Xu Shuai, Ren Guanzhou, et al. Dual-mode model predictive control strategy forpermanent magnet synchronous traction motor in the full speed range [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 748-758.
- [12] 刘春喜, 赵文江, 马龙涛, 等. NPC 型并网逆变器参数自适应预测电流控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 362-375.
- Liu Chunxi, Zhao Wenjiang, Ma Longtao, et al. Adaptive predictive current control strategy for NPC-type grid-connected inverters parameters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 362-375.
- [13] Tang Y R, Xu W, Ge J, et al. Improved dual-vector predictive flux control with parameter identification for three-level inverter-fed linear induction machines in linear metro [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 11(1): 4083-4096.
- [14] 吴振军, 刘震坤, 郭磊磊, 等. 基于抗频率偏移电感辨识的并网逆变器模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 99-107.
- Wu Zhenjun, Liu Zhenkun, Guo Leilei, et al. Model predictive control for a grid-connected inverter based on inductance identificationresistant to frequency deviation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 99-107.
- [15] 王皎懿, 傅晓帆, 郑华俊, 等. 基于参数自适应补偿的并网逆变器双矢量鲁棒预测控制[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 79-87.
- Wang Jiaoyi, Fu Xiaofan, Zheng Huajun, et al. Dual-vector robust predictive control for grid-connected invertersbased on parameter adaptive compensation[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 79-87.
- [16] Huang W T, Huang M J, Yang W L, et al. Continuous-control-set model-free predictive current control with voltage correction of five-phase PMSM [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(3): 2119-2129.
- [17] Hu C G, Lyu L, Rui T, et al. Model-free predictive control of LCL-filtered voltage source inverter with parameter-free references [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(12): 12912-12922.
- [18] Zhu Z H, Wei X L, Han R X, et al. Double-vector model-free predictive current control for PMSMs with influence rejection of DC voltage mismatch [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 11(2): 6143-6153.
- [19] Zhao T, Zhang M Z, Wang C L, et al. Model-free predictive current control of three-level grid-connected inverters with LCL filters based on Kalman filter [J]. IEEE Access, 2023, 11: 21631-21640.
- [20] Kermadi M, Rebai A, Baghli L, et al. Model-free predictive current controller for voltage source inverters using ARX model and recursive least squares[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(5): 2619-2623.
- [21] 辛业春, 王延旭, 李国庆, 等. T 型三电平并网逆变器有限集模型预测控制快速寻优方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1681-1692.
- Xin Yechun, Wang Yanxu, Li Guoqing, et al. Finite

control set model predictive control method with fast optimization based on T-type three-level grid-connected inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1681-1692.

[22] 徐岸非,蔡玉华,袁雷,等. 单相 NPC 逆变器三矢量模型预测电流控制[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 175-183.

Xu Anfei, Cai Yuhua, Yuan Lei, et al. 3-vector model predictive current control of single-phase npc inverter[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2025, 46(2): 175-183.

[23] 汪凤翔,汤小雪,于新红,等. 弱电网下基于谐振阻尼优化的 LCL 型并网逆变器预测控制[J]. 电工技术学报, 2026, 41(8): 2822-2835.

Wang Fengxiang, Tang Xiaoxue, Yu Xinhong, et al. Predictive control of LCL-type grid-connected inverter based on optimized resonance damping under weak grid conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(8): 2822-2835.

[24] 徐可,刘春喜,林枝伟,等. NPC 三电平 LCL 型并网逆变器事件触发模型预测控制[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(5): 23-33.

Xu Ke, Liu Chunxi, Lin Zhiwei, et al. Event-triggered model predictive control for NPC three-level LCL-type grid-connected inverters [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering Energy, 2025, 44(5): 23-33.

作者简介



刘春喜(通信作者),2001 年和 2004 年于辽宁工程技术大学分别获得学士学位和硕士学位,2010 年于浙江大学获得博士学位,现为辽宁工程技术大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为双向变流器拓扑结构及其控制技术。

E-mail: lntulcx@163.com

Liu Chunxi (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2001 and 2004, respectively, and his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2010. He is currently an associate professor and master's supervisor at Liaoning Technical University. His main research interests include bidirectional converter topology and control technology.



蔡磊,2023 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电气传动控制技术。

E-mail: 1171133807@qq.com

Cai Lei received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2023, and he is currently pursuing his M. Sc. degree at the same institution. His main research interest include power electronics and electric drive control technology.



赵文江,2023 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电气传动控制技术。

E-mail: 1198832873@qq.com

Zhao Wenjiang received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2023, and he is currently pursuing his M. Sc. degree at the same institution. His main research interests include power electronics and electric drive control technology.



李世纪,2022 年于长春工程学院获得学士学位,2025 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位,现工作于国网吉林省电力有限公司超高压公司,主要研究方向为并网逆变器优化控制技术。

E-mail: 884797948@qq.com

Li Shiji received his B. Sc. degree from Changchun Institute of Technology University in 2022 and M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2025. He is currently employed at State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd. Ultra High Voltage Company. His main research interests include optimized control techniques for grid-connected inverters.



王禹,2024 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为电力电子变换器拓扑与控制技术。

E-mail: 894318386@qq.com

Wang Yu received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2024. He is currently pursuing his M. Sc. degree at the same institution. His main research interests include power electronic converter topologies and control technology.