DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.289　　**中图分类号**：TM46　　**文献标志码**：A

基于三电平变换器的永磁同步电机快速模型预测控制

熊川羽[1]，张秀青[2](中国电源学会会员)，马　莉[1]，舒思睿[1]，熊　一[1]，柯方超[1]
(1.国网湖北省电力有限公司经济技术研究院，武汉 430000；2.中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所，合肥 230031)

摘要：基于三电平变换器驱动永磁同步电机时，传统模型预测控制策略计算负担大的问题，提出 1 种优化策略。首先，对永磁同步电机进行了离散化建模；其次，将 Nelder-Mead 算法应用到三电平变换器最优电压矢量的选取中，通过不断迭代，以获取使电流控制误差最小的电压矢量；最后，结合直流侧电容电压确定输出电压矢量。所提优化策略在 1 个控制周期仅进行至多 7 次电流预测。实验验证表明，相较于传统模型预测控制策略，所提优化策略的计算时间缩短了约 45%，且稳态控制性能未受到影响。同时，所提优化策略具有良好的直流侧电容电压平衡能力。

关键词：永磁同步电机；三电平变换器；模型预测控制；计算效率

Fast Model Predictive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Three-level Converter

XIONG Chuanyu[1], ZHANG Xiuqing[2], *Member*, *CPSS*, MA Li[1], SHU Sirui[1], XIONG Yi[1], KE Fangchao[1]
(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China;
2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To address the computational burden associated with traditional model predictive control strategies when a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is driven by three-level converters, an optimization strategy is proposed. First, a discretized model of the PMSM is developed. Second, the Nelder-Mead algorithm is applied to the selection of optimal voltage vectors for the three-level converter, iteratively seeking the voltage vector that minimizes the current control errors. Finally, the output voltage vector is determined in conjunction with the DC-side capacitor voltage. The proposed optimization strategy involves a maximum of seven current predictions within a control cycle. Experimental validation demonstrates that compared with the traditional model predictive control strategy, the proposed optimization strategy reduced the computation time by approximately 45%, without compromising the steady-state control performance. Moreover, this strategy exhibited excellent DC-side capacitor voltage balancing capability.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor (PMSM); three-level converter; model predictive control; computational efficiency

收稿日期：2023-10-14；**修回日期**：2023-11-23；**录用日期**：2023-12-04；**网络首发日期**：2024-03-27
基金项目：国网湖北经研院面向未来配电网的分布式能源集约化实时控制技术研发及应用资助项目(521538220003)
This work is supported by Research and Application of Distributed Energy Intensive Real-time Control Technology for Future Distribution Networks by Economic and Technological Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. under the grant 521538220003

与传统的电励磁电机相比，永磁同步电机 PMSM(permanent magnet synchronous motor)具有更为简单的结构、更小的体积、更高的效率及更可靠的性能。因此，PMSM 已经广泛应用在电动汽车、冶金加工、石油开采等众多领域[1-2]。模型预测控制在 PMSM 驱动系统中，根据控制目标不同可分为模型预测电流控制 MPCC(model predictive

current control)和模型预测转矩控制 MPTC(model predictive torque control)。模型预测控制通过选取价值函数最优的开关状态，从而使变换器输出最优电压矢量，可以有效提高系统的动态响应性能，减小电流和转矩脉动[3-7]。

随着电力电子技术的发展，二极管中点钳位式 NPC(neutral-point-clamped)三电平逆变器凭借其更小的电压应力、更多的矢量选择范围等优点逐渐在 PMSM 驱动中得到应用[8-9]。由于传统的三电平变换器的模型预测控制需进行 27 次枚举预测，计算量繁重，尤其是在多矢量和多步预测中。为提高模型预测控制的计算效率，需要改进传统的矢量选择方法。文献[10]通过构建偏差函数，挑选出对抑制偏差有益的电压矢量，将备选电压矢量的数量减少至 14 个；文献[11]根据上一时刻选择的电压矢量决定下一个电压矢量的选择，将备选电压矢量减少到至多 13 个；文献[12]首先计算 6 个正小矢量的价值函数，然后选择与最优正小矢量位于同一扇区的矢量构建简化控制集；文献[13]根据参考矢量所在的扇区，将每次迭代计算的矢量个数从 27 个减少到 10 个。

此外，为避免复杂的多目标优化计算，现有文献提出不再将直流侧电容电压平衡控制纳入价值函数中，从而无需设计权重因子。为实现该控制目标，主要有以下 2 种方法：①在单矢量 FCS-MPC 策略中，根据直流侧电容电压的偏差选择合适的冗余小矢量[14]；②在双矢量和三矢量 FCS-MPC 策略中，通过调整冗余矢量的作用时间实现中点电压平衡[15-16]。

针对计算负担大、多目标寻优调节复杂问题，本文提出 1 种基于 Nelder-Mead 算法的永磁同步电机三电平模型预测控制方法。其中，Nelder-Mead 算法是 1 种直接搜索方法，也是 1 种启发式搜索方法。该算法程序精简，受参数影响较小，具有快速搜索能力。其基本思想是每次迭代均得到比上一次更优的值，先找出 1 组基本可行解，判断之中是否存在当前最优解；若不存在当前最优解，则按照一定法则进行转换，对当前的基本可行解进行改进，改进后得到 1 组更优的基本可行解，再进行判断；若仍不存在最优解，则不断迭代，直到搜寻到最优可行解。

所提方法首先通过选取并比较 3 个电压矢量的电流控制误差；然后根据算法选取另一个电压矢量替换误差最大的电压矢量，通过至多 3 次迭代，根据电流控制误差最小原则获取最优电压矢量；最后结合直流侧电容电压确定输出矢量。与传统三电平 MPC 策略相比，每个控制周期仅进行 7 次电流预测，有效地降低了算法的计算量。

1 模型预测电流控制

1.1 三电平变换器数学模型

基于三电平变换器的永磁同步电机控制拓扑结构如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流母线电压；C_1 和 C_2 为直流侧母线电容；U_{C_1} 和 U_{C_2} 为母线电容电压。根据开关器件的开关状态不同，每相桥臂可输出 3 种不同的电平(P、O 和 N)，三相桥臂则共组合成 27 种不同的开关状态矢量，可定义开关函数为

$$S_x=\begin{cases}1 & x\text{相输出P电平}\\ 0 & x\text{相输出O电平}\\ -1 & x\text{相输出N电平}\end{cases}\qquad x=\mathrm{a,b,c}\tag{1}$$

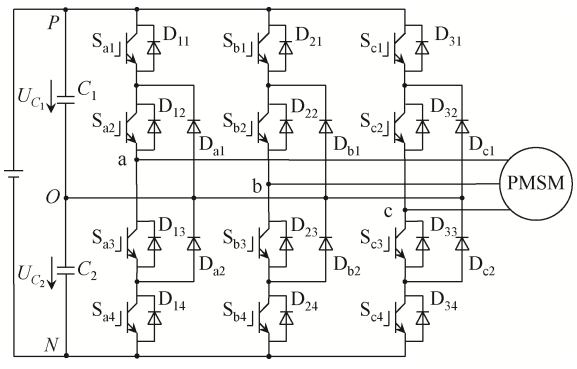


图 1 三电平变换器驱动 PMSM 拓扑结构

Fig. 1 Topology of PMSM driven by three-level converter

三电平逆变器在工作过程中，导致电容电压不平衡的直接原因为流经直流侧中点的电流不为 0。中点电流的表达式为

$$i_O=i_{\mathrm{a}}(1-|S_{\mathrm{a}}|)+i_{\mathrm{b}}(1-|S_{\mathrm{b}}|)+i_{\mathrm{c}}(1-|S_{\mathrm{c}}|)\tag{2}$$

式中，i_{a}、i_{b} 和 i_{c} 均为三相输出电流。

假设直流侧电容均为 C，$k+1$ 时刻的电容电压差值的预测值为

$$\Delta U^{k+1}=U_{C_1}^{k}-U_{C_2}^{k}+\frac{i_O^{k+1}}{C}T_{\mathrm{s}} \tag{3}$$

式中：$U_{C_1}^{k}$ 和 $U_{C_2}^{k}$ 为 k 时刻的电容电压；i_O^{k+1} 为第 $k+1$ 个控制周期的控制量代入式(3)得到的中点电流；T_{s} 为控制周期。

1.2 PMSM 数学模型

假定表贴式 PMSM 忽略定子和转子铁心磁阻，不计涡流和磁滞损耗，转子无阻尼绕组，定子绕组感应电动势为正弦波，建立 dq 旋转坐标系下的数学模型。其中定子电流方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{L_{\mathrm{s}}}(U_q-R_{\mathrm{s}}i_q-\omega_{\mathrm{e}}L_{\mathrm{s}}i_d-\omega_{\mathrm{e}}\psi_{\mathrm{f}})\\ \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{L_{\mathrm{s}}}(U_d-R_{\mathrm{s}}i_d-\omega_{\mathrm{e}}L_{\mathrm{s}}i_q)\end{cases} \tag{4}$$

式中：i_d 和 i_q 分别为直、交轴电流；L_{s} 为定子电感；U_d 和 U_q 分别为直、交轴电压；R_{s} 为定子电阻；ω_{e} 为转子电角速度；ψ_{f} 为永磁体磁链。

采用一阶欧拉离散法，将式(4)离散化得到

$$\begin{cases}i_d^{k+1}=i_d^{k}+\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{s}}}(U_d^{k}-R_{\mathrm{s}}i_d^{k}+\omega_{\mathrm{e}}L_{\mathrm{s}}i_q^{k})\\ i_q^{k+1}=i_q^{k}+\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{s}}}(U_q^{k}-R_{\mathrm{s}}i_q^{k}-\omega_{\mathrm{e}}L_{\mathrm{s}}i_d^{k}-\omega_{\mathrm{e}}\psi_{\mathrm{f}})\end{cases} \tag{5}$$

式中：i_d^{k+1} 和 i_q^{k+1} 均为 $k+1$ 时刻定子电流预测值；i_d^{k} 和 i_q^{k} 均为 k 时刻定子电流采样值；U_d^{k} 和 U_q^{k} 均为当前时刻定子电压。

1.3 价值函数

MPCC 主要是以电流控制误差和直流侧电容电压差为评价指标，故一般将价值函数设计为

$$J=\left|i_q^{*}-i_q^{k+1}\right|+\left|i_d^{*}-i_d^{k+1}\right|+\lambda(\Delta U^{k+1})^2 \tag{6}$$

式中：i_d^{*} 和 i_q^{*} 分别为 d、q 轴电流分量的给定值；λ 为权重系数。

逐一将 27 个电压矢量作为第 $k+1$ 个控制周期的控制量并基于价值函数评估，选取使价值函数值最小的电压矢量为最优电压矢量并作用到三电平变换器上。

2　基于 Nelder-Mead 算法的 MPCC

电流控制和直流侧电容电压控制均采用分层控制，从而无需调节权重系数。首先以电流控制效果作为评价指标，并基于 Nelder-Mead 算法搜索最优电压矢量。其次，若所得最优电压矢量为小矢量，需结合直流侧电容电压进一步确定输出矢量。

2.1 基于 Nelder-Mead 算法的寻优过程

以电流控制效果作为评价指标，并采用 Nelder-Mead 算法搜索最优电压矢量。首先在三电平电压矢量图中选择合适的三角形，比较三角形 3 个顶点电压矢量预测的电流控制误差。其中，误差最大的顶点将被替换，继而形成新的三角形。新三角形形成后，未达到终止条件则继续迭代。这个过程中的每一步均会出现新的顶点，形成一系列不同坐标的三角形且三角形顶点所代表的电流控制误差将逐渐变小，直到顶点满足最小化要求。具体步骤如下。

(1)选择初始三角形。为了进一步减少计算量，初始三角形 $\triangle ABC$ 选择在电压矢量图中心，如图 2 所示。计算三角形各个顶点电压矢量对应的电流控制误差(冗余小矢量在 dq 坐标系下的坐标是相同的，因此仅需评估其中 1 个)，并比较得出 3 个值中最大的值。

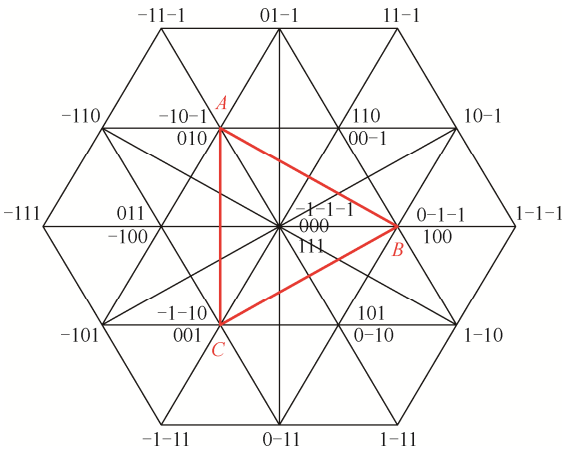


图 2　初始三角形位置

Fig. 2 Location of initial triangle

(2)反射。由步骤(1)可以得出三角形 3 个顶点

中电流控制误差最大的电压矢量，根据 Nelder-Mead 算法，以另外 2 个顶点的连线为对称轴，将最差顶点的坐标进行反射，构造新三角形。假设最差点为 *C* 点，则反射后的新三角形△*ABD* 位置如图 3 所示。若出现新顶点仍为最差值的情况或者有 2 个顶点出现在矢量图六边形边界或界外的情况，则结束步骤(2)的迭代并进入下一步骤，否则重复步骤(2)的迭代。

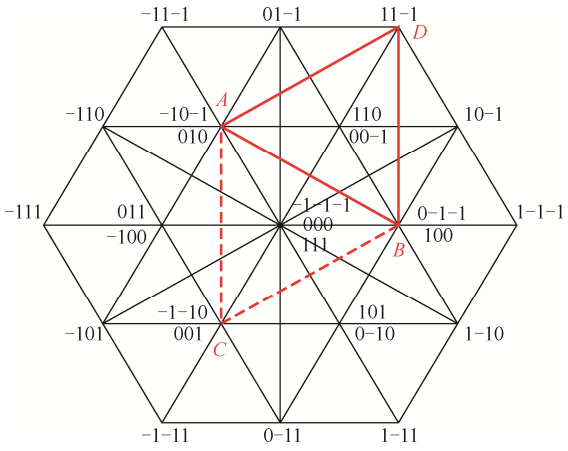


图 3 反射后三角形示意

Fig. 3 Schematic of triangle after reflection

(3)收缩。若出现新顶点仍为最差值的情况，则最优电压矢量位于基于新旧三角形收缩的菱形内。以图 3 情况为例，若 *D* 点仍然为最坏顶点，将菱形 *ACBD* 收缩为菱形 *AEBF*，如图 4 所示。对于△*ABC*，*C* 点误差最大，则最优矢量在∠*AEB* 对应的 120° 区域内；对于△*ABD*，*D* 点误差最大，则最优矢量在∠*AFB* 对应的 120° 区域内。上述 120° 区域的 aa 重叠区域为菱形 *AEBF*，因此最优矢量在该菱形内。菱形 *AEBF* 的 4 个顶点对应的电压矢量中，选择电流控制误差最小者作为最优电压矢量。按照上述步骤，仅至多 7 次计算即可得出电流控制的最优电压矢量。

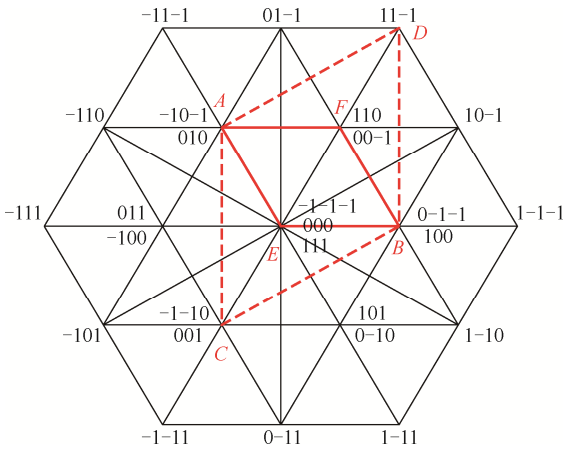


图 4 收缩后菱形示意

Fig. 4 Schematic of rhombus after contraction

2.2 直流侧电容电压平衡控制

1 对冗余小矢量会导致不同极性的 i_O，从而对直流侧电容电压平衡控制产生相反的作用效果。根据不同的作用效果，小矢量分为 P 型小矢量和 N 型小矢量，见表 1。

表 1 小矢量分类

Tab. 1 Classification of small vectors

类型	i_O	小矢量
P 型小矢量	$i_O<0$	(1,0,0) (1,1,0) (0,1,0) (0,1,1) (0,0,1) (1,0,1)
N 型小矢量	$i_O>0$	(0,−1,−1) (0,0,−1) (−1,0,−1) (−1,0,0) (−1,−1,0) (0,−1,0)

对于第 2.1 节中得到的最优电压矢量，将其 3 个元素进行排序，如果最大值和最小值的差为 1，则代表该矢量为小矢量。其对应的冗余矢量可以通过加上或减去 (1,1,1) 得到。然后，基于表 1 和直流侧电容电压，选择合适的矢量作为输出矢量。

3 实验验证

为验证本文所提策略的有效性，搭建了 1 套小功率 PMSM 控制系统实验平台，由驱动模块、电源模块、信号采集模块和上位机组成，如图 5 所示。采用的电机型号为 SYNTRON 60CB020C-020000 系列交流伺服电机，其具体参数见表 2。主处理器采用 TI 公司生产的 TMS320F28335 型数字信号处理器芯片，主频为 150 MHz，主要作用包括运行电机的控制算法等；辅控制器为型号 XC6SLX9-2TQG144C 的 FPGA 芯片，用于采集 PMSM 的转速、位置和角度等信号，同时负责发送控制脉冲开启 DSP 中断。

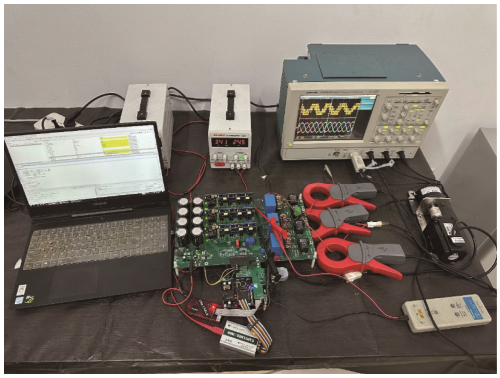


图 5　三电平 PMSM 测试平台

Fig. 5 Three-level PMSM test platform

表 2　永磁同步电机参数

Tab. 2 Parameters of PMSM

参数	数值
极对数	4
转矩系数/(N·m·A^{-1})	0.712
直流母线电压/V	50
额定转速/(r·min^{-1})	1 500
额定转矩/(N·m)	1.27
机械时间常数/ms	1.08
转子惯量/(kg·cm^{-2})	0.3
额定相电流/A	2.5
瞬时最大相电流/A	7.33
电枢绕组相电阻/Ω	5.58
电枢绕组相电感/mH	17.33
编码器(P/R)	2 500

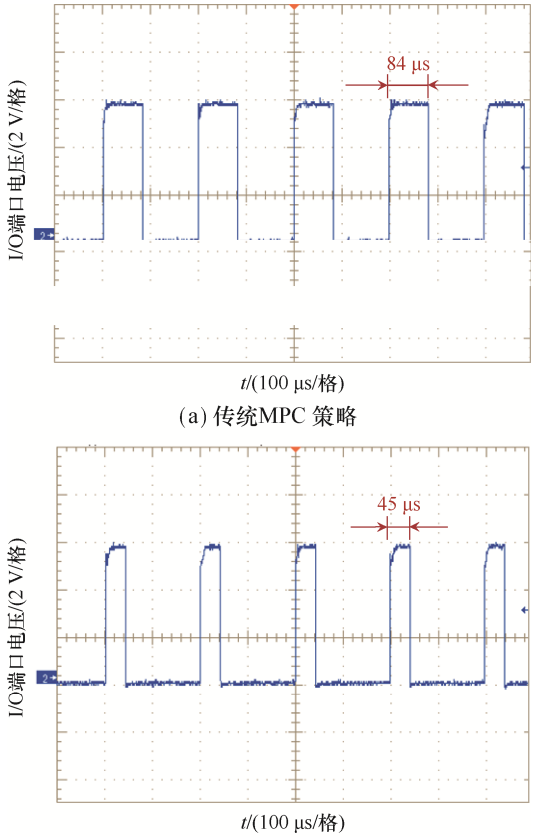
3.1　计算效率测试

为了对比传统 MPC 控制策略与所提控制策略的计算效率，在实验中采用 DSP 的 I/O 端口测试算法执行时间，当算法开始执行时，I/O 端口的电平被设置为高电平，算法执行完后重置为低电平，不同策略的执行时间如图 6 所示。根据图 6 可知，传统 MPC 策略执行时间为 84 μs；本文所提的策略仅需 45 μs，计算效率显著提升。

3.2　稳态控制性能测试

控制器采样频率设置为 10 kHz，当转速设置为 300 r/min 时，稳态实验结果如图 7 所示。将 A 相电流波形数据导入到 MATLAB/Simulink 中进行快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)分析，频率范围为 0~10 kHz，得到总谐波失真 THD(total harmonic distortion)分别为 13.97%和 13.51%。此外，开关频率约为 5.4 kHz。当转速设置为 600 r/min 时，实验结果如图 8 所示，THD 分别为 8.63%和 8.76%，开关频率约为 2.1 kHz。

为了进一步测试稳态性能，当转速设置为 600 r/min 时，将 *dq* 轴电流数据通过串口发送到上位机，所得结果如图 9 所示。对于 2 种策略，电流脉动均在 0.6 A 左右。因此，所提策略在极大地提高计算效率的同时，未对稳态控制性能产生影响。

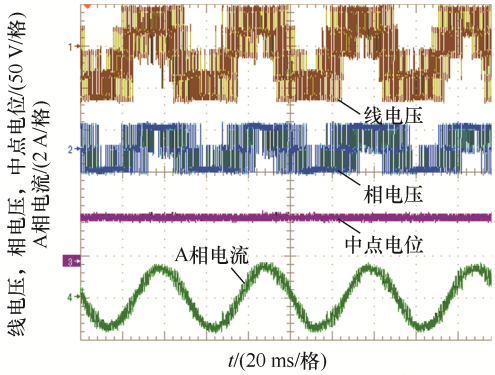


(a) 传统MPC 策略

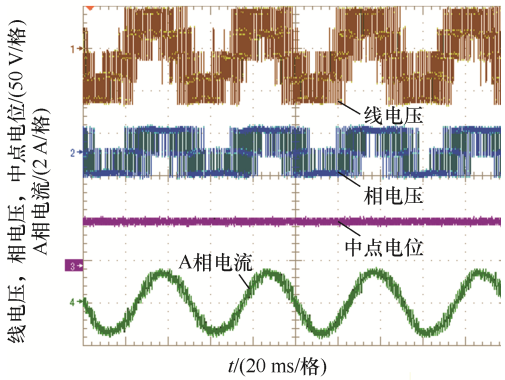
(b) 所提策略

图 6　不同策略的执行时间

Fig. 6 Execution time under different strategies



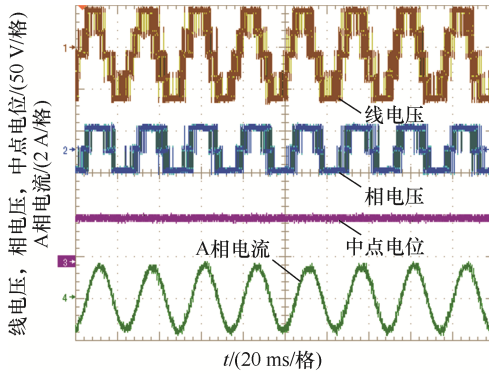
(a) 传统MPC策略



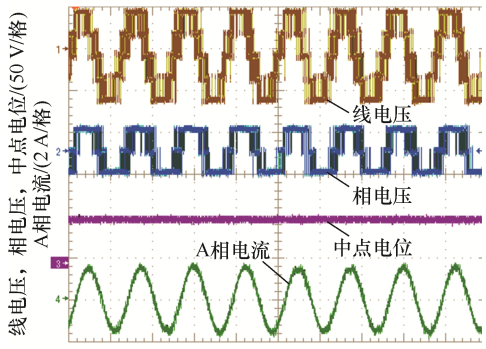
(b) 所提策略

图 7 转速为 300 r/min 时稳态波形

Fig. 7 Steady-state waveforms at speed of 300 r/min



(a) 传统MPC策略



(b) 所提策略

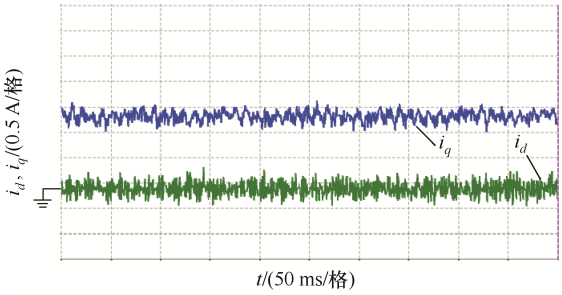
图 8 转速为 600 r/min 时稳态波形

Fig. 8 Steady-state waveforms at speed of 600 r/min

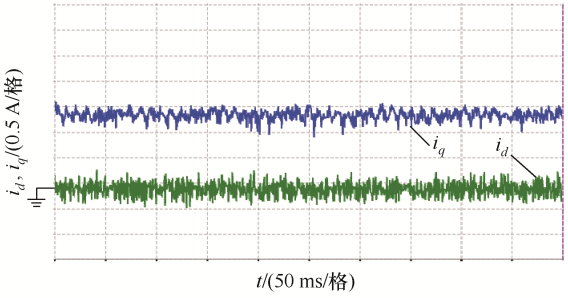
此外，由图 7 和图 8 可见，电机稳态运行过程中，直流侧电容电压均未发生明显波动。因此，所提策略具有良好的直流侧电容电压平衡能力。

3.3 动态控制性能测试

对于所提策略，负载转矩保持 0.2 N·m，当转速从 300 r/min 突变到 600 r/min 时，实验结果如图 10 所示。从实验波形中可以看出，在转速发生突变时，所提策略可以较好地跟踪给定转速，且直流侧电容电压未发生明显波动。



(a) 传统MPC策略



(b) 所提策略

图 9 转速为 600 r/min 时 *dq* 轴电流波形

Fig. 9 Current waveforms on *d*- and *q*-axis at speed of 600 r/min

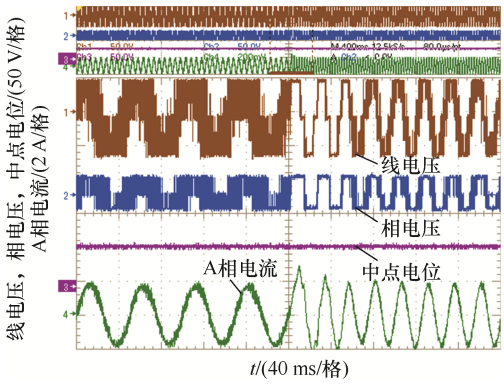


图 10 动态波形

Fig. 10 Dynamic waveforms

4 结语

本文针对基于三电平变换器驱动 PMSM 时，传统 MPC 策略计算量较大的问题，提出了 1 种基于 Nelder-Mead 算法的优化 MPC 策略，该策略避免了使用枚举的方式来选择最优电压矢量。实验结果表明，相较于传统 MPC 策略，所提策略的计算时间缩短了约 45%，且稳态控制性能不受影响。因

此，该策略具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] Yang Jian, Zhou Jingyang, Zhou Hanbin, et al. High-precision harmonic current extraction for PMSM based on multiple reference frames considering speed harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 9764-9776.

[2] 吴翔, 陈硕, 李佳, 等. 基于改进正交锁相环的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 475-486.
Wu Xiang, Chen Shuo, Li Jia, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on improved quadrature phase-locked loop [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 475-486. (in Chinese)

[3] Zhou Hanbin, Yang Jian, Huang Liansheng, et al. Nonexcessive-Δ*V* and low complexity model predictive control based on finite-state machine for three-level three-phase inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 8355-8366.

[4] 张鹏, 刘洋, 王伟康, 等. 基于模型预测控制的多相交错 Buck 变换器动态响应优化方法[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 66-75.
Zhang Peng, Liu Yang, Wang Weikang, et al. Dynamic response optimization method for multi-phase interleaved Buck converter based on model predictive control [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 66-75. (in Chinese)

[5] 周世炯, 李耀华, 史黎明, 等. 分段式双三相永磁直线同步电机的无模型电流预测控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 996-1009.
Zhou Shijiong, Li Yaohua, Shi Liming, et al. Model-free predictive current control of segmented dual three-phase permanent magnet linear synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 996-1009. (in Chinese)

[6] 周汉斌, 杨建, 黄连生, 等. 基于有限状态机的三电平逆变器双矢量模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 155-164.
Zhou Hanbin, Yang Jian, Huang Liansheng, et al. Double-vector model predictive control strategy of three-level inverter based on finite state machine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 155-164. (in Chinese)

[7] 周汉斌, 杨建, 陈晓娇, 等. 考虑死区电压矢量的三电平变换器模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5290-5301.
Zhou Hanbin, Yang Jian, Chen Xiaojiao, et al. Model predictive control of three-level converter considering dead-zone voltage vector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5290-5301. (in Chinese)

[8] Zorig A, Barkat S, Sangwongwanich A. Neutral point voltage balancing control based on adjusting application times of redundant vectors for three-level NPC inverter [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5604-5613.

[9] 王朝晖, 冯凌, 杨顺风, 等. 基于 NPC 型三电平逆变器的固定开关频率改进模型预测控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 79-87.
Wang Zhaohui, Feng Ling, Yang Shunfeng, et al. Improved model predictive control strategy with fixed switching frequency based on NPC three-level inverter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 79-87. (in Chinese)

[10] Habibullah M, Lu D D, Xiao Dan, et al. Predictive torque control of induction motor sensorless drive fed by a 3L-NPC inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 60-70.

[11] Zhang Yongchang, Bai Yuning, Yang Haitao, et al. Low switching frequency model predictive control of three-level inverter-fed IM drives with speed-sensorless and field-weakening operations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4262-4272.

[12] 吴琪, 胡存刚, 张云雷, 等. 三电平 ANPC 变换器快速模型预测控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 103-106.
Wu Qi, Hu Cungang, Zhang Yunlei, et al. Research on fast model predictive control strategy for three-level ANPC converter [J]. Power Electronics, 2020, 54(4): 103-106. (in Chinese)

[13] 王洋, 程志江, 李永东. 三电平并网变换器的模型预测控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 34-41.
Wang Yang, Cheng Zhijiang, Li Yongdong. Model predictive control of three-level grid-connected converter

[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(10): 34-41. (in Chinese)

[14] Yang Yong, Wen Huiqing, Fan Mingdi, et al. Fast finite-switching-state model predictive control method without-tweighting factors for T-type three-level three-phase inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1298-1310.

[15] 罗龙, 李耀华, 李子欣, 等. 一种基于双矢量恒定开关频率的三电平 ANPC 型全桥逆变器模型预测控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 343-355.
Luo Long, Li Yaohua, Li Zixin, et al. A model predictive control method of three-level ANPC type full-bridge inverter based on dual vector constant switching frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 343-355. (in Chinese)

[16] Yang Yong, Pan Jianyu, Wen Huiqing, et al. Double-vector model predictive control for single-phase five-level actively clamped converters [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 1202-1213.



熊川羽

作者简介：

熊川羽(1989—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：xiongcy12@hb.sgcc.com.cn。

张秀青(1980—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，副研究员。研究方向：电力电子。E-mail：xqzhang@ipp.ac.cn。

马莉(1989—)，女，博士，高级工程师。研究方向：电力工程经济及投资。E-mail：mali2@hb.sgcc.com.cn。

舒思睿(1998—)，女，硕士，助理工程师。研究方向：电力电子化电力系统稳定性。E-mail：shusr@hb.sgcc.com.cn。

熊一(1988—)，男，博士，高级工程师。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：xiongy13@hb.sgcc.com.cn。

柯方超(1973—)，男，本科，高级工程师。研究方向：电力工程建设。E-mail：kefc@hb.sgcc.com.cn。

(责任编辑：耿越)