

# 永磁同步电机级联模型预测转矩控制优化<sup>\*</sup>

李耀华, 秦 辉, 苏锦仕, 王孝宇, 陈桂鑫, 刘子焜, 刘东梅  
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 针对永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)权重系数设计和调节的问题,将权重系数连接的多目标成本函数并联形式转换为单目标成本函数的级联形式,从而消除权重系数。建立基于级联法的表面式PMSM MPTC,研究级联顺序及输出电压矢量个数对系统控制性能和计算量的影响。提出简化排序比较计算量的方法和采用模糊控制器动态调节输出电压矢量个数的优化策略。仿真结果表明:基于级联法的表面式PMSM MPTC可行,无需权重系数设计和调节。当第一级输出6个电压矢量时,采用简化算法的第一级排序比较次数和运行耗时分别减小71.43%和71.67%,整体运行耗时减少2.28%。与传统级联法相比,模糊动态级联MPTC可动态调节不同控制目标的重要性,减小转矩和磁链脉动,抑制动态磁链脉动,优化控制性能。

**关键词:** 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 级联法; 模糊控制

**中图分类号:** TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)04-0016-10

**doi:** 10.12177/emca.2023.025

## Optimization of Cascaded Model Predictive Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor<sup>\*</sup>

LI Yaohua, Qin Hui, Su Jinshi, WANG Xiaoyu, CHEN Guixin, LIU Zikun, LIU Dongmei  
(School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at the design and adjustment of the weighting factors for model predictive torque control (MPTC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the parallel form of multi-object cost functions connected by weighting factors is converted into the cascaded form of single-object cost function, therefore to eliminate the weighting factors. The MPTC for surface PMSM based on cascaded method is established to study the effect of cascaded sequence and the number of output voltage vectors on the system control performance and calculation quantity. The method to simply the sorting comparison calculation and the optimization strategy to dynamically adjust the number of output voltage vectors using a fuzzy controller are proposed. The simulation results show the MPTC for surface PMSM based on cascaded method is feasible without the design and adjustment of weighting factors. When the first stage outputs 6 voltage vectors, the number of sorting comparison and the running time of the first stage using the simplified algorithm are reduced by 71.43% and 71.67% respectively, and the total running time is reduced by 2.28%. Compared with conventional cascaded method, the fuzzy dynamic cascaded MPTC can dynamically adjust the importance of different control objectives, decrease torque and stator flux ripple, suppress dynamic flux ripple, and optimize control performance.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); cascaded method; fuzzy control

收稿日期: 2022-10-24; 收到修改稿日期: 2023-01-30

<sup>\*</sup> 基金项目: 陕西省自然科学基金(2021JM-163); 西安市碑林区科技计划项目(GX2252)

作者简介: 李耀华(1980—),男,博士,副教授,研究方向为机电电控与新能源汽车技术。

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)有限状态集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)通过遍历逆变器所有电压矢量,并将其代入磁链和转矩预测模型,得到下一时刻的磁链和转矩预测值,并将预测值代入体现控制性能的成本函数,选择令成本函数最小的电压矢量。模型预测控制采用的成本函数灵活性强,可轻易实现多目标控制和非线性约束,近年来受到高度关注<sup>[1-7]</sup>。但不同于模型预测电流控制的控制变量为同一量纲的定子电流  $d$ 、 $q$  轴分量,模型预测转矩控制(MPTC)的控制变量为不同量纲和数量级别的磁链和转矩,需要设置权重系数来平衡磁链控制和转矩控制,同时权重系数的数值应随电机状态动态调整。因此,MPTC 具有权重系数的设计和调节问题。权重系数大多采用试验法确定,过程繁琐<sup>[8-10]</sup>。文献[11-13]将磁链和转矩转换为磁链和转矩的相对误差率或标么值,但如果增加开关次数等其他重要性不同的控制目标,依然需要权重系数。文献[14-15]将多目标决策理论中的折中妥协法(VIKOR)和优劣解距离法(TOPSIS)引入成本函数以消除权重系数,但实现过程较为复杂。文献[16]构造含权重系数的转矩误差方程,以转矩误差最小设计权重系数,但计算也较为复杂。文献[17-20]采用模糊控制动态调节权重系数,但模糊控制规则的设计较难实现。文献[21-23]采用粒子群算法和神经网络算法实现权重系数的自整定,但也存在需要构造大量训练数据集及算法计算量大的问题。文献[24-27]将控制变量转换为无量纲的成本函数排序位置,从而消除权重系数,但其将成本函数寻最优转换为成本函数排序,增加了排序计算量,对实时性产生影响。

对于多目标优化控制,权重系数是平衡不同控制目标的重要方法。但如果控制目标唯一,则无需权重系数。因此,可将采用权重系数连接的多目标成本函数并联形式转换为无需权重系数的单目标成本函数级联形式来消除权重系数<sup>[28-31]</sup>。本文建立表面式 PMSM 级联 MPTC,研究级联顺序及输出电压矢量个数对系统控制性能和计算量的影响,并提出简化排序比较计算量的方法和采用模糊控制器动态调节输出电压矢量个数的策

略。仿真验证本文所提表面式 PMSM 级联 MPTC 可行,无需权重系数设计和调节;简化算法可有效减少排序比较次数和运行耗时;模糊动态级联 MPTC 可减小转矩和磁链脉动,抑制动态磁链脉动。

## 1 PMSM 级联 MPTC

### 1.1 PMSM MPTC

定子坐标系下,表面式 PMSM 磁链和转矩预测模型分别如下所示<sup>[32-33]</sup>:

$$\psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}, q = \frac{V_s(k) \cdot \Delta t}{\psi_s(k)} \quad (1)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_f\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \times \sin[\delta(k) + \arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}] \quad (2)$$

式中: $\psi_s(k)$  和  $\delta(k)$  分别为  $k$  时刻的定子磁链幅值和转矩角; $V_s(k)$  为施加电压矢量幅值; $\alpha$  为施加电压矢量与定子磁链矢量的夹角; $\psi_s(k+1)$  和  $T_e(k+1)$  分别为  $k+1$  时刻的定子磁链幅值和转矩; $p$ 、 $\psi_f$  和  $L_d$  分别为电机极对数、永磁体磁链和  $d$  轴电感; $\Delta t$  为采样周期。

对于两电平电压源逆变器供电的 PMSM MPTC 系统,备选电压矢量集合如下所示:

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (3)$$

式中:零电压矢量  $V_0$  可由开关状态 000 或 111 生成,具体以开关次数最小原则来确定<sup>[34]</sup>:

MPTC 的控制目标为转矩和磁链,其成本函数如下所示:

$$g_{T_e} = |T_e(k+1) - T_e^*(k)| \quad (4)$$

$$g_{\psi_s} = |\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)| \quad (5)$$

式中: $T_e^*(k)$  和  $\psi_s^*(k)$  分别为当前时刻转矩和磁链的参考值。

### 1.2 级联 MPTC

#### 1.2.1 转矩控制第一级

将转矩控制作为第一级,第一级的备选电压矢量如式(3)所示,其为逆变器的 7 个基本电压矢量,成本函数如式(4)所示。由于第一级只控制转矩,控制目标唯一,则无需权重系数。将 7 个电压矢量遍历代入式(2)所示的转矩模型,得到 7

个下一时刻的预测转矩,再将其代入式(4),则可得到7个表征转矩控制效果的成本函数。此时,输出前  $N$  个成本函数最小值对应的电压矢量 ( $1 \leq N \leq 7$ ),则完成第一级转矩控制。将第一级输出的  $N$  个电压矢量作为第二级磁链控制的备选电压矢量,将这  $N$  个电压矢量遍历代入式(1)所示的磁链模型,得到7个下一时刻的磁链预测值,再将其代入式(5),则可得到  $N$  个表征磁链控制效果的成本函数,并输出成本函数最小值对应的电压矢量,最终实现级联 MPTC。

转矩控制为第一级的 PMSM 级联 MPTC 系统如图1所示。

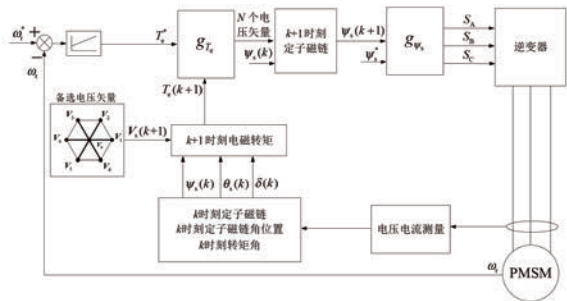


图1 转矩控制第一级的 PMSM 级联 MPTC 系统

由图1可知,第一级输出的电压矢量个数  $N$  对系统有较大的影响。 $N$  越大,转矩控制的作用越小,磁链控制的作用越大,当  $N=7$ ,第一级转矩控制实际没有作用。 $N$  越小,转矩控制的作用越大,磁链控制的作用越小,当  $N=1$ ,第二级磁链控制实际没有作用。

基于 MATLAB/Simulink 建立转矩控制为第一级的表面式 PMSM 级联 MPTC 系统仿真模型。仿真模型为离散模型,采样周期为  $5 \times 10^{-5}$  s。直流母线电压为 312 V,转速 PI 调节器参数为  $K_p=5, K_i=100$ ,输出范围为  $[-30 \text{ N}\cdot\text{m}, 30 \text{ N}\cdot\text{m}]$ 。电机由静止状态起动,参考转速为 400 r/min,负载转矩为  $20 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,仿真时长为 4 s,参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。仿真用表面式 PMSM 参数如下:定子电阻  $R_s=0.2 \Omega$ ,定子电感  $L_d=L_q=0.0085 \text{ H}$ ,永磁体磁链  $\psi_f=0.175 \text{ Wb}$ ,电机极对数  $p=4$ ,额定转速为 750 r/min,额定转矩为  $12 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,额定功率为 0.94 kW。

以  $N=3$  为例,PMSM 级联 MPTC 仿真波形如图2和图3所示。

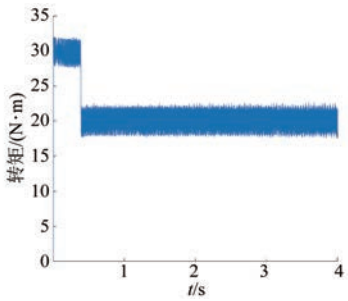


图2 转矩控制第一级的电机转矩

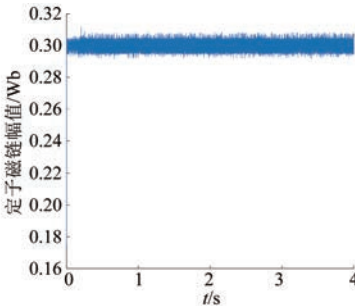


图3 转矩控制第一级的定子磁链幅值

定义转矩脉动均方根误差(RMSE)、磁链脉动 RMSE 和平均开关频率  $f_{ave}$  如下:

$$T_{rip\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (6)$$

$$\psi_{rip\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (7)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (8)$$

式中: $n$  为采样个数; $N_{switching}$  为开关次数; $t$  为仿真时间。

转矩控制第一级输出不同电压矢量个数下,电机系统控制性能如表1所示。

表1 转矩控制第一级的电机系统控制性能

| $N$ | $T_{rip\_RMSE}/(\text{N}\cdot\text{m})$ | $\psi_{rip\_RMSE}/\text{Wb}$ | $f_{ave}/\text{kHz}$ |
|-----|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------|
| 1   |                                         | 失控                           |                      |
| 2   | 1.021 3                                 | 0.003 9                      | 5.90                 |
| 3   | 1.054 2                                 | 0.002 9                      | 5.22                 |
| 4   |                                         | 失控                           |                      |
| 5   |                                         | 失控                           |                      |
| 6   |                                         | 失控                           |                      |
| 7   |                                         | 失控                           |                      |

由仿真结果可知,当转矩控制为第一级,第一级输出电压矢量个数  $N=1,4,5,6$  和  $7$  时,系统失控;输出电压矢量个数  $N=2$  时的转矩控制效果优于  $N=3$  时,但磁链脉动及开关频率要高于  $N=3$  时。

1.2.2 磁链控制第一级

将磁链控制作为第一级的结构与转矩控制第一级的结构正好相反,第一级根据磁链控制成本函数输出前  $N$  个成本函数最小值对应的电压矢量,第二级输出转矩控制成本函数最小值对应的电压矢量。上文相同仿真条件下,当  $N=3$ ,磁链控制第一级的 PMSM 级联 MPTC 仿真波形如图 4 和图 5 所示。

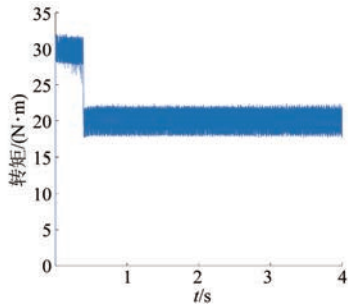


图 4 磁链控制第一级的电机转矩

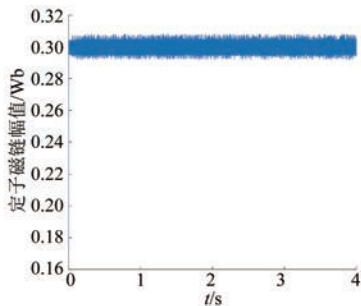


图 5 磁链控制第一级的定子磁链幅值

磁链控制第一级输出不同电压矢量个数下,电机系统控制性能如表 2 所示。

表 2 磁链控制第一级的电机系统控制性能

| $N$ | $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 1   |                             | 失控                    |               |
| 2   |                             | 失控                    |               |
| 3   | 1.025 6                     | 0.003 2               | 5.42          |
| 4   | 1.074 0                     | 0.003 9               | 6.20          |
| 5   | 0.977 9                     | 0.005 7               | 7.05          |
| 6   | 1.029 1                     | 0.030 7               | 7.38          |
| 7   |                             | 失控                    |               |

由仿真结果可知,当磁链控制为第一级,第一级输出电压矢量个数  $N=1,2$  和  $7$  时,系统失控;当  $N=3,4,5$  和  $6$  时,随着  $N$  的增大,磁链脉动增大,开关频率变大。但由于磁链控制影响转矩控制,转矩脉动出现不规则变化。

1.2.3 计算量分析

由级联法原理可知,以转矩控制第一级为例,控制流程如下。

(1) 转矩预测。将 7 个备选电压矢量代入转矩预测模型,求得 7 个下一时刻的转矩预测值,并将 7 个转矩预测值代入转矩控制成本函数  $g_{T_e}$ ,计算得到 7 个转矩控制成本函数,计算量为 7 次转矩预测。这里需要指出,如果  $N=7$ ,则无需转矩预测。

(2) 第一级输出。输出 7 个转矩控制成本函数最小至第  $N$  位所对应的电压矢量作为下一级的备选电压矢量。这里需要指出,第一级仅需输出成本函数最小至第  $N$  位的电压矢量,无需 7 个成本函数全部排序,计算量为前  $N$  个排序。

(3) 磁链预测。将  $N$  个备选电压矢量代入磁链预测模型,求得  $N$  个下一时刻的磁链预测值,将  $N$  个磁链预测值代入磁链控制成本函数  $g_{\psi_s}$ ,计算得到  $N$  个磁链控制成本函数,计算量为  $N$  次磁链预测。这里需要指出,如果  $N=1$ ,则无需磁链预测。

(4) 第二级输出。输出  $N$  个成本函数最小对应的电压矢量,计算量为  $N-1$  次比较计算。

综上,转矩控制第一级输出不同电压矢量个数时,级联法计算量如表 3 所示。

表 3 级联法计算量

| $N$ | 转矩预测<br>次数 | $g_{T_e}$ 比较<br>次数 | 磁链预测<br>次数 | $g_{\psi_s}$ 比较<br>次数 |
|-----|------------|--------------------|------------|-----------------------|
| 1   | 7          | 6                  | 0          | 0                     |
| 2   | 7          | 11                 | 2          | 1                     |
| 3   | 7          | 15                 | 3          | 2                     |
| 4   | 7          | 18                 | 4          | 3                     |
| 5   | 7          | 20                 | 5          | 4                     |
| 6   | 7          | 21                 | 6          | 5                     |
| 7   | 0          | 0                  | 7          | 6                     |

传统 MPTC 的计算量为转矩预测 7 次,磁链

预测 7 次,成本函数比较仅需 6 次。与传统 MPTC 相比,由于需要对前  $N$  个成本函数排序,当第一级输出电压矢量个数较多时,级联法的排序比较计算量较大。

2 考虑开关次数的级联 MPTC

对于 MPTC,如果控制目标的增加减小了开关次数,则可将开关次数也作为级联法中的一级。但如上文所述,级联的顺序和每一级输出电压矢量个数对系统性能均有影响,当级联数目较多时,确定级联顺序和每一级输出电压矢量个数也较为复杂。因此,级联的数目不宜过多。本文将磁链和转矩控制统一为性能控制,再增加开关次数控制,依然保持级联数为 2。性能控制成本函数如下:

$$g_p = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)}\right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*(k)}{\hat{\psi}_s^*(k)}\right]^2}$$
 (9)

开关次数控制成本函数如下:  
$$g_{switching} = 2 \times [|S_A(k) - S_A(k-1)| + |S_B(k) - S_B(k-1)| + |S_C(k) - S_C(k-1)|]$$
 (10)  
式中: $S_A(k)$ 、 $S_B(k)$ 和 $S_C(k)$ 分别为施加电压矢量对应的开关状态; $S_A(k-1)$ 、 $S_B(k-1)$ 和 $S_C(k-1)$ 分别为上一时刻开关状态。

由式(10)可知,开关次数控制成本函数  $g_{switching}$  如表 4 所示。

表 4 开关次数控制成本函数

| 上一时刻开<br>关状态 | 施加电压矢量 |       |       |       |       |       |       |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | $V_0$  | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ |
| 000          | 0      | 2     | 4     | 2     | 4     | 2     | 4     |
| 100          | 2      | 0     | 2     | 4     | 6     | 4     | 2     |
| 110          | 2      | 2     | 0     | 2     | 4     | 6     | 4     |
| 010          | 2      | 4     | 2     | 0     | 2     | 4     | 6     |
| 011          | 2      | 6     | 4     | 2     | 0     | 2     | 4     |
| 001          | 2      | 4     | 6     | 4     | 2     | 0     | 2     |
| 101          | 2      | 2     | 4     | 6     | 4     | 2     | 0     |
| 111          | 0      | 4     | 2     | 4     | 2     | 4     | 2     |

由表 4 可知,开关次数控制成本函数存在排序不唯一的问题,不宜作为第一级。因此,本文将

性能控制作为第一级。性能控制为第一级的 PMSM 级联 MPTC 系统如图 6 所示。

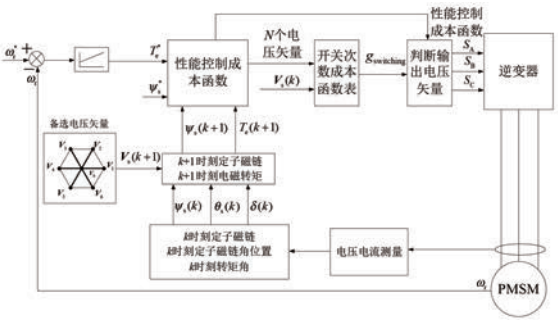


图 6 性能控制为第一级的 PMSM 级联 MPTC 系统

由图 6 可知,性能控制第一级的 PMSM 级联 MPTC 流程如下。

- (1) 性能预测。将 7 个备选电压矢量代入磁链和转矩预测模型,求得下一时刻的预测值,并将其代入性能控制成本函数,计算得到 7 个成本函数。
- (2) 第一级输出。输出 7 个性能控制成本函数最小至第  $N$  位所对应的电压矢量作为下一级的备选电压矢量。
- (3) 开关次数预测。根据上一时刻开关状态和第一级输出  $N$  个电压矢量,直接查表得到开关次数。
- (4) 第二级输出。选择开关切换次数最小对应的电压矢量。这里需要指出,由表 4 可知,开关切换次数最小对应的电压矢量并不唯一。因此,当开关切换次数最小对应的电压矢量不唯一时,需基于第一步的成本函数排序,输出性能控制成本函数最小的电压矢量。由于性能控制成本函数排序在第一步已经完成,没有增加额外的排序计算量。

上文相同仿真条件下,当  $N=3$  时,PMSM 级联 MPTC 仿真波形如图 7 和图 8 所示。

定义性能综合评价函数均值  $m_{ave}$  如下:

$$m_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{T_e - T_e^*}{T_e^*}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\psi}_s - \hat{\psi}_s^*}{\hat{\psi}_s^*}\right)^2}}{n}$$
 (11)

性能控制第一级输出不同电压矢量个数下,电机系统控制性能如表 5 所示。



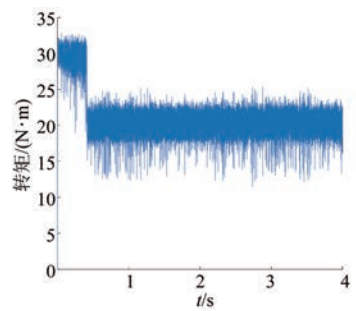


图7 性能控制第一级的电机转矩

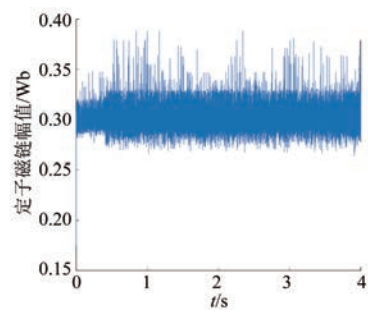


图8 性能控制第一级的定子磁链幅值

表5 性能控制第一级的电机系统控制性能

| $N$ | $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $m_{ave}$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----|-----------------------------|-----------------------|-----------|---------------|
| 1   | 1.004 3                     | 0.003 5               | 0.039 4   | 6.05          |
| 2   | 0.948 7                     | 0.007 2               | 0.042 2   | 3.57          |
| 3   | 1.675 5                     | 0.012 7               | 0.067 4   | 2.28          |
| 4   |                             | 失控                    |           |               |
| 5   |                             | 失控                    |           |               |
| 6   |                             | 失控                    |           |               |
| 7   |                             | 失控                    |           |               |

由仿真结果可知,随着第一级输出电压矢量数目的增大,系统综合性能降低,平均开关频率降低;当  $N>3$ ,系统失控。

3 简化级联 MPTC

由上文可知,当第一级输出电压矢量个数较多时,级联法的排序比较计算量较大。下文提出一种简化排序比较计算量的方法:当  $N>3$  时,不再按成本函数最小排序得到最小至第  $N$  位的电压矢量,采用按成本函数最大排序得到最大至  $7-N$  位的电压矢量,并将其补集作为下一级的备选电压矢量集合。因此,简化算法可在控制性能完全相同的情况下,减少排序比较计算

次数。

采用传统算法和简化算法的第一级排序比较计算量如表 6 所示。由表 6 可知,当  $N>3$ ,简化算法可减小排序比较计算量。

表6 第一级排序比较计算次数

| $N$ | 传统算法 | 简化算法 |
|-----|------|------|
| 1   | 6    | 6    |
| 2   | 11   | 11   |
| 3   | 15   | 15   |
| 4   | 18   | 15   |
| 5   | 20   | 11   |
| 6   | 21   | 6    |

为验证简化算法对计算负担的减小效果,基于 STM32H743 单片机平台对传统算法和简化算法进行单步运算执行时间试验,实时性测试用例数据如表 7 所示。

表7 实时性测试用例数据

| 参数名称                       | 参数值       |
|----------------------------|-----------|
| 参考转矩/( $N \cdot m$ )       | 20.590 9  |
| 参考定子磁链幅值/Wb                | 0.3       |
| 当前时刻电机转矩/( $N \cdot m$ )   | 19.911 27 |
| 当前时刻转矩角/( $^\circ$ )       | 33.853 98 |
| 当前时刻定子磁链幅值/Wb              | 0.293 769 |
| 当前时刻定子磁链矢量角位置/( $^\circ$ ) | 62.844 43 |
| 上一时刻电压矢量                   | $V_3$     |

性能控制第一级输出不同电压矢量个数下,传统算法和简化算法单步计算耗时分别如表 8 和表 9 所示,其中时间数据为重复运行 10 000 次单步验证时间的平均值。

表8 传统算法单步计算耗时 ms

| $N$ | 第一级预测耗时   | 第一级排序耗时 | 第二级耗时  | 总耗时       |
|-----|-----------|---------|--------|-----------|
| 1   | 2 518.815 | 23.402  | 0      | 2 542.217 |
| 2   | 2 517.530 | 42.004  | 5.800  | 2 565.334 |
| 3   | 2 518.623 | 57.007  | 10.601 | 2 586.231 |
| 4   | 2 517.548 | 68.808  | 19.802 | 2 606.158 |
| 5   | 2 518.077 | 77.409  | 23.033 | 2 618.519 |
| 6   | 2 518.595 | 82.610  | 26.403 | 2 627.608 |

表 9 简化算法单步计算耗时 ms

| <i>N</i> | 第一级预测耗时   | 第一级排序耗时 | 第二级耗时  | 总耗时       |
|----------|-----------|---------|--------|-----------|
| 1        | 2 518.773 | 23.402  | 0      | 2 542.175 |
| 2        | 2 517.476 | 42.003  | 5.801  | 2 565.280 |
| 3        | 2 517.567 | 57.007  | 10.601 | 2 585.175 |
| 4        | 2 517.811 | 57.006  | 19.802 | 2 594.619 |
| 5        | 2 517.625 | 42.004  | 23.003 | 2 582.632 |
| 6        | 2 517.712 | 23.403  | 26.403 | 2 567.518 |

由表 6~表 9 可知,当第一级输出电压矢量个数  $N>3$  时,简化算法可减少排序计算量和运行耗时。以  $N=6$  为例,简化算法可减少排序比较次数的 71.43%、排序计算耗时的 71.67%。但由于预测耗时占算法整体耗时的绝大部分,简化算法对整体执行时间的优化效果有限,总耗时减少 2.28%。由于第一级控制需要遍历全部备选状态进行预测,第二级只需遍历第一级输出的  $N$  个备选状态。因此,在控制效果相当的情况下,可将预测运算时间长的控制目标放在第二级,从而减小预测计算耗时。

4 模糊动态级联 MPTC

电机运行状态是动态变化的,控制目标的相对重要性也应动态变化以更好地满足系统需求。由上文可知,第一级输出电压矢量个数体现第一级控制的重要程度。第一级输出电压矢量个数越少,第一级控制越重要。因此,可根据系统状态动态调整第一级输出电压矢量的个数。下文采用模糊控制器动态调整第一级输出电压矢量个数来动态调节不同控制目标的重要性,优化系统控制性能。

模糊控制器使用电机转矩误差绝对值和磁链误差绝对值作为输入变量,第一级输出电压矢量个数  $N$  作为输出变量。转矩误差绝对值  $|\Delta T|$  论域为  $[0\text{ N}\cdot\text{m}, 2\text{ N}\cdot\text{m}]$ ,分为 3 个模糊子集  $\{T_s, T_m, T_b\}$ ,隶属度函数如图 9 所示。磁链误差绝对值  $|\Delta\psi|$  论域为  $[0\text{ Wb}, 0.02\text{ Wb}]$ ,分为 3 个模糊子集  $\{P_s, P_m, P_b\}$ ,隶属度函数如图 10 所示。 $N$  的输出论域为  $[0.5, 3.5]$ ,分为 3 个模糊子集  $\{n_1, n_2, n_3\}$ ,隶属度函数如图 11 所示。

模糊控制规则如表 10 所示。经过 Mamdani

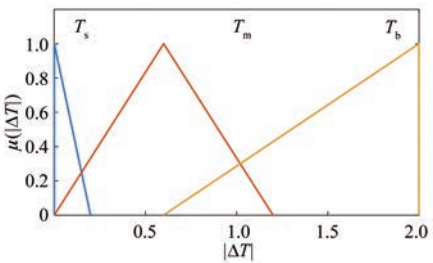


图 9 转矩误差绝对值隶属度函数

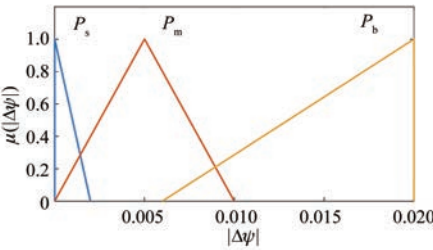


图 10 磁链误差绝对值隶属度函数

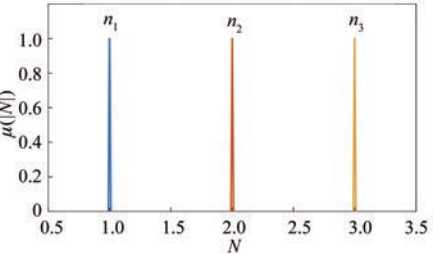


图 11  $N$  的隶属度函数

模糊推理后,采用最大隶属度平均法解模糊并输出。

表 10 模糊控制规则表

| <i>N</i>             | $ \Delta T $ |       |       |
|----------------------|--------------|-------|-------|
|                      | $T_b$        | $T_m$ | $T_s$ |
| $P_b$                | $n_1$        | $n_1$ | $n_2$ |
| $ \Delta\psi $ $P_m$ | $n_1$        | $n_2$ | $n_2$ |
| $P_s$                | $n_2$        | $n_2$ | $n_3$ |

模糊动态 PMSM 级联 MPTC 系统如图 12 所示。仿真条件设置如下:参考转速初始值为 400 r/min,2 s 时阶跃至 -400 r/min,负载转矩为 20 N·m,1 s 时阶跃至 -20 N·m,3 s 时阶跃至 20 N·m,仿真时长为 4 s,其余仿真条件不变,对传统级联 MPTC (第一级输出电压矢量个数  $N=2$ ) 和模糊动态 PMSM 级联 MPTC 进行仿真验证,仿真结果如图 13~图 19 所示。

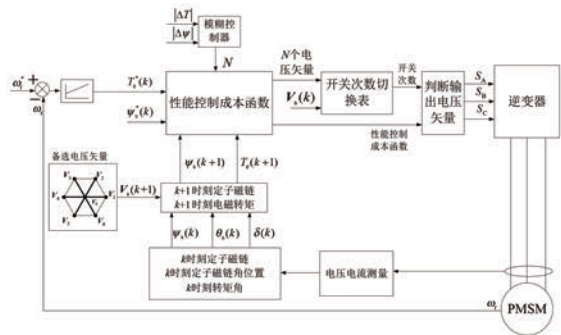


图 12 模糊动态 PMSM 级联 MPTC 系统

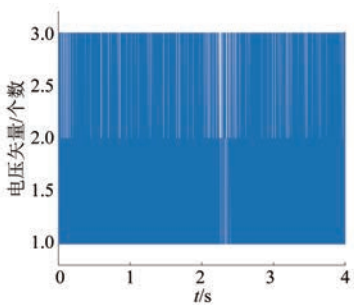


图 16 模糊控制器确定的第一级输出电压矢量个数

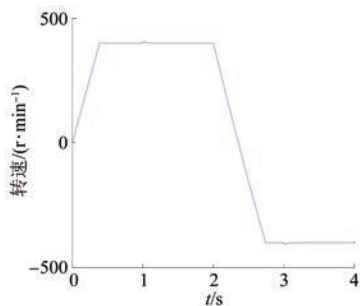


图 13 传统级联 MPTC 转速

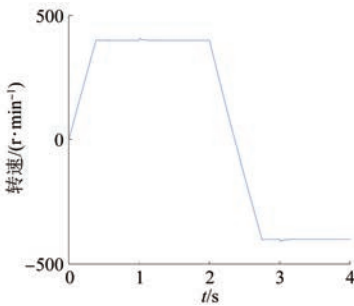


图 17 模糊动态级联 MPTC 转速

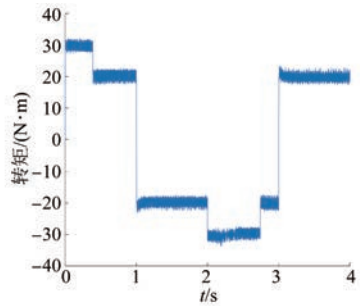


图 14 传统级联 MPTC 转矩

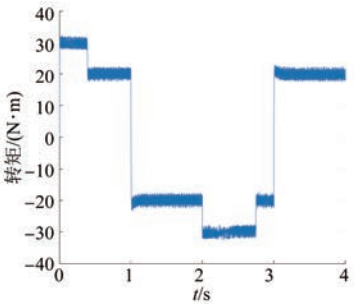


图 18 模糊动态级联 MPTC 转矩

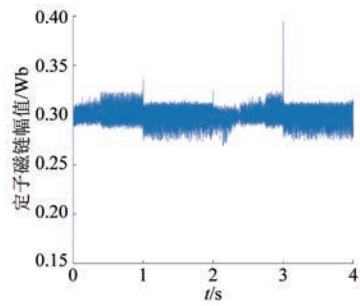


图 15 传统级联 MPTC 定子磁链幅值

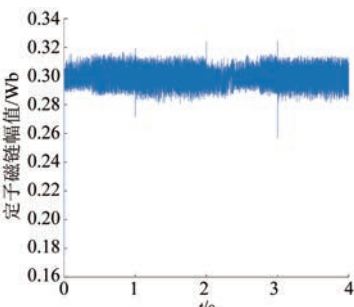


图 19 模糊动态级联 MPTC 定子磁链幅值

不同控制策略下,PMSM 级联 MPTC 系统性能如表 11 所示。

表 11 PMSM 级联 MPTC 系统性能

| 控制策略 | $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|------|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 传统   | 0.889 7                     | 0.007 1               | 3.09          |
| 模糊动态 | 0.878 3                     | 0.005 8               | 3.32          |



传统级联 MPTC 和模糊动态级联 MPTC 的转矩和磁链如图 20 和图 21 所示。

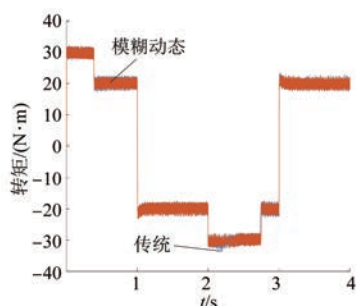


图 20 转矩对比

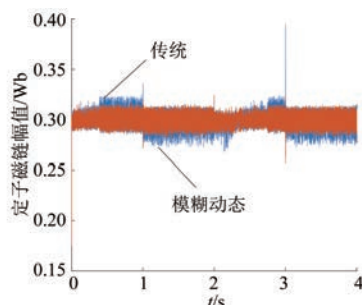


图 21 定子磁链幅值对比

由仿真结果可知,与传统级联 MPTC 相比,模糊动态级联 MPTC 根据转矩和磁链误差动态调节第一级输出电压矢量的个数,从而减小转矩和磁链脉动,抑制动态磁链脉动,但开关频率轻微增大。

## 5 结 语

(1) 仿真证明基于级联法的 PMSM MPTC 可行。

(2) 级联结构中各级输出的电压矢量个数对系统性能影响较大,需要合理设置。以两级控制为例,第一级输出电压矢量个数越少,第一级重要性越大,控制效果越好,第二级重要性越小,控制效果越差。若第一级仅输出 1 个电压矢量,则第二级实际不发挥作用。若第一级输出全部电压矢量,则第一级实际不发挥作用。

(3) 级联顺序对控制性能也有一定的影响,且不存在对偶性。

(4) 级联控制的输出电压矢量个数和级联顺序对计算量也有影响。当第一级输出电压矢量个数较多时,排序比较计算量较大。在控制效果相当的情况下,应将预测运算时间长的控制目标放

在第二级,从而减少预测计算量。

(5) 当输出电压矢量个数  $N > 3$  时,可采用按成本函数最大排序得到最大至  $7 - N$  位的电压矢量,并将其补集作为下一级的备选电压矢量集合来减小排序计算量。

(6) 通过模糊控制动态调整输出电压矢量个数可动态调节不同控制目标的重要性,优化系统控制性能。相对于连续变化的权重系数,由于输出电压矢量个数离散有限,模糊控制器设计简单易行。

## 【参 考 文 献】

- [1] KOURO S, PEREZ M A, RODRIGUEZ J, et al. Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2015, 9(4): 8.
- [2] VAZQUEZ S, RODRIGUEZ J, RIVERA M, et al. Model predictive control for power converters and drives: advances and trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 935.
- [3] KARAMANAKOS P, GEYER T. Guidelines for the design of finite control set model predictive controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7434.
- [4] 柳志飞,杜贵平,杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58.
- [5] 牛峰,李奎,王尧. 永磁同步电机模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(12): 60.
- [6] 李耀华,杨启东,秦玉贵,等. 基于模糊控制的永磁同步电机动态有限状态集模型预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(9): 94.
- [7] 李耀华,赵承辉,周逸凡,等. 基于数据驱动的永磁同步电机深度神经网络控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 115.
- [8] CORTES P, KOUROS, ROCCA B L, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives[C] //2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009.
- [9] 齐昕,苏涛,周珂,等. 交流电机模型预测控制策略发展概述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6408.
- [10] 李耀华,秦辉,苏锦仕,等. 表面式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制成本函数研究[J]. 电机

- 与控制应用, 2019, 46(9): 12.
- [11] 李耀华, 刘洋, 孟祥臻. 一种表面式永磁同步电机有限状态集模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 33.
- [12] 郭磊磊, 孙怡舒, 李琰琰, 等. PMSM 无权重系数转矩预测控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 426.
- [13] 李耀华, 张鑫泉, 崔康东, 等. 永磁同步电机标幺化无权重系数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 7.
- [14] MUDDINENI V P, BONALA A K, SANDEPUDI S R. Enhanced weighting factor selection for predictive torque control of induction motor drive based on VIKOR method [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 877.
- [15] MUDDINENI V P, SANDEPUDI S R, BONALA A K. Finite control set predictive torque control for induction motor drive with simplified weighting factor selection using TOPSIS method [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 749.
- [16] DAVARI S A, KHABURI D A, KENNEL R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1540.
- [17] JUSTO J J, MWASILU F, KIM E K, et al. Fuzzy model predictive direct torque control of IPMSMs for electric vehicle applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1542.
- [18] 涂文聪, 骆光照, 刘卫国. 基于模糊动态代价函数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 89.
- [19] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 永磁同步电机模糊自适应变开关次数权重系数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 102.
- [20] 史涔涔, 马红如, 陈卓易, 等. 永磁同步电机模糊代价函数预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 1.
- [21] TOMISLAV D, MATEJA N. Weighting factor design in model predictive control of power electronic converters: an artificial neural network approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8870.
- [22] 李家祥, 汪凤翔, 柯栋梁, 等. 基于粒子群算法的永磁同步电机模型预测控制权重系数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 50.
- [23] 李程, 廖丽诚, 冯凌, 等. 神经网络在永磁同步电机模型预测控制参数寻优中的应用[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 86.
- [24] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 681.
- [25] ESWAR K M R, KUMAR K V P, KUMAR T V. Modified predictive torque and flux control for open end winding induction motor drive based on ranking method[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 463.
- [26] 夏超英, 田聪颖, 张耀华, 等. 基于多目标排序的无刷双馈电机预测控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 1.
- [27] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 基于排序法的表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 6.
- [28] NORAMBUENA M, RODRIGUEZ J, ZHANG Z, et al. A very simple strategy for high-quality performance of AC machines using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 794.
- [29] ZHANG Z, ZHANG B, NORAMBUENA M, et al. Generalized sequential model predictive control of IM drives with field-weakening ability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8944.
- [30] 吴春, 杨佳磊, 陈强. 准 Z 源逆变器级联模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4286.
- [31] 魏祥林, 杨维满, 王晗, 等. 储能型准 Z 源光伏发电系统级联模型预测控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 76.
- [32] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 电动汽车用永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择策略[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 43.
- [33] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻. 表面式永磁同步电机直接转矩控制系统简化预测控制策略[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 96.
- [34] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞. 自适应变电压矢量 PMSM 直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 75.
- [35] 李耀华, 杨启东, 刘洋, 等. 表面式永磁同步电机模型预测直接转矩控制备选电压矢量集合研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 87.