

表贴式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制 成本函数研究*

李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 杨启东, 任佳越, 秦玉贵, 赵承辉, 周逸凡
(长安大学汽车学院, 陕西西安 710064)

摘要: 针对表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制系统, 提出了一种均衡磁链控制和转矩控制的权重系数设计方法, 将磁链控制和转矩控制转换为相对误差率的成本函数, 从而无需权重系数设计。仿真结果验证以上 2 种成本函数运行效果良好, 但前者对电机参数依赖性较强。由于上述 2 种成本函数均不含磁链约束项, 转矩动态下磁链出现较大的脉动。因此提出了一种含磁链控制约束的成本函数, 仿真结果表明, 可有效消除磁链脉动。同时, 还设计了使用磁链约束项代替磁链控制项的成本函数, 但仿真结果表明, 虽也可有效消除磁链脉动, 但控制效果不及前 3 种成本函数。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 成本函数; 权重系数; 磁链脉动

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)09-0012-07

Cost Function of Finite Control Set Model Predictive Torque Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor*

LI Yaohua, QIN Hui, SU Jinshi, YANG Qidong, REN Jiayue,
QIN Yugui, ZHAO Chenghui, ZHOU Yifan
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: For finite control set model predictive torque control of surface permanent magnet synchronous motor, a weight coefficient design method which balanced flux linkage control and torque control was proposed. A cost function without weight coefficient was given, which used relative error rates instead of errors to realize flux linkage and torque control. Simulation results showed that the system worked properly by using these two proposed cost functions, but the former strongly depended on motor parameters. As these two functions did not contain flux linkage constraint item, high stator flux ripple would occur under dynamic torque change. Therefore, the third cost function including flux linkage constraint item was proposed. Simulation results showed that it could decrease the stator flux ripple effectively. The fourth cost function was also proposed, which replaced the flux linkage control item with the flux linkage constraint item. Simulation results showed that the fourth cost function could also decrease the stator flux ripple, but the control performances was not as good as the above three cost functions.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor; model predictive torque control; cost function; weight coefficient; flux ripple

0 引言

有限状态集模型预测控制充分利用逆变器有

限的开关状态, 基于控制系统预测模型, 遍历得到所有开关状态下的系统输出, 选择令成本函数最小的开关状态作为输出^[1-5]。近年来, 模型预测

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51207012); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-069); 陕西省微特电机及驱动技术重点实验室开放基金项目(2013SSJ2002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102228201)

作者简介: 李耀华(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机控制与新能源汽车技术。

控制技术在永磁同步电机领域的应用受到了普遍的关注^[6-10]。

成本函数作为模型预测控制选择开关状态的唯一标准,对系统的性能具有重要的作用。成本函数具有较大的柔性,可将不同性质和控制目标的控制变量统一在同一个成本函数中。对于相同量纲的控制变量,如:模型预测电流控制中的 d - q 轴电流误差,成本函数无需设定权重系数^[11]。但对于模型转矩控制,磁链和转矩是不同量纲的物理变量,需要设置权重系数,实现磁链控制和转矩控制的平衡。文献[12]通过试验监测不同控制变量、性能变化,试凑获取权重系数。文献[13]使用转矩误差期望值和磁链误差期望值的比值来确定权重系数。文献[14]通过令转矩脉动最小求解得出最优权重系数。文献[15-17]将磁链控制和转矩控制转换为单一的磁链控制、电压矢量作用时间控制和电压矢量控制,从而省去权重系数设计。文献[18]对不同控制变量性能进行排序打分,将不同量纲的物理量转换为无量纲的排序得分,也无需权重系数设计。

本文针对表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 模型预测转矩控制系统成本函数开展研究,基于磁链和转矩变化表达式提出了一种均衡磁链控制和转矩控制的权重系数初值确定方法;同时为了省去权重系数设定,将磁链误差和转矩误差转换为磁链相对误差率和转矩相对误差率,设计了无需权重系数设定的成本函数。针对转矩动态变化磁链会出现较大脉动的问题,设计了含磁链约束的成本函数和用磁链约束代替磁链控制的 2 种成本函数。仿真结果验证了本文设计的成本函数的有效性。

1 模型预测转矩控制

定子磁链坐标系下,忽略定子电阻压降和机械运动引起的转子磁链角位置变化,在施加电压矢量一个采样周期 Δt 后,下一时刻的定子磁链幅值 $\hat{\psi}_s(k+1)$ 和转矩角 $\delta(k+1)$:

$$\begin{cases} \hat{\psi}_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \frac{\hat{U}_s(k) \cdot \Delta t}{\hat{\psi}_s(k)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta(k+1) \approx \delta(k) + \Delta\theta_s =$$

$$\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \quad (2)$$

式中: $\hat{\psi}_s(k)$ 、 $\mathbf{U}_s(k)$ 、 $\delta(k)$ ——当前时刻的定子磁链、施加的电压矢量和转矩角;

α ——施加电压矢量与定子磁链的夹角;

$\Delta\theta_s$ ——施加电压矢量引起的定子磁链角度变化。

由 SPMSM 转矩方程可知,下一时刻的电机转矩为

$$T_e(k+1) = \frac{3p\hat{\psi}_s(k+1)\psi_f}{2L_d} \sin \delta(k+1) \quad (3)$$

式中: p ——电机极对数;

ψ_f ——永磁体磁链;

L_d —— d 轴电感。

将式(1)和式(2)代入式(3),可得下一时刻电机转矩:

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_f\hat{\psi}_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot \sin \left[\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \right] \quad (4)$$

由式(1)和式(4)的预测模型,可实现定子磁链坐标系下对电机磁链和转矩的预测计算。预测模型表明下一时刻定子磁链幅值和转矩由所施加的电压矢量唯一确定。

模型预测转矩控制的备选电压矢量集合为

$$\mathbf{U}_s \in \{\mathbf{U}_0, \mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \mathbf{U}_4, \mathbf{U}_5, \mathbf{U}_6\} \quad (5)$$

其中 6 个非零电压矢量幅值为 $2U_{dc}/3$, U_{dc} 为直流母线电压,零电压矢量幅值为零。

定义含权重系数的成本函数 g 为

$$g = \sqrt{[T_e(k+1) - T_e^*]^2 + \lambda[\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*]^2} \quad (6)$$

式中: $T_e(k+1)$ 、 $\hat{\psi}_s(k+1)$ ——下一时刻预测得出的转矩和定子磁链值;

T_e^* 、 $\hat{\psi}_s^*$ ——下一时刻转矩和定子磁链的参考值;

λ ——权重系数。

由于采样时间较小,本文用当前时刻的转矩和定子磁链的参考值代替下一时刻参考值。

当系统稳态时,转矩和定子磁链的参考值和实际值相差较小,则:

$$\begin{cases} \hat{\psi}_s^* \approx \hat{\psi}_s(k) \\ T_e^* \approx T_e(k) \end{cases} \quad (7)$$

因此,成本函数可近似为

$$g = \sqrt{[T_e(k+1) - T_e(k)]^2 + \lambda[\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s(k)]^2} \quad (8)$$

对于 SPMSM,施加电压矢量引起的磁链和转矩变化可近似为^[19-20]

$$\begin{cases} \hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s(k) \approx \hat{\psi}_s(k) \cdot q \cdot \cos \alpha \\ T_e(k+1) - T_e(k) \approx \frac{3p\psi_f}{2L_d} \cdot \hat{\psi}_s(k) \cdot q \cdot \sin[\alpha + \delta(k)] \end{cases} \quad (9)$$

由于正余弦函数的值域是同一数量级,所以磁链控制分量与转矩控制分量近似相差 $\frac{3p\psi_f}{2L_d}$ 倍,因此设定权重系数为

$$\lambda = \left(\frac{3p\psi_f}{2L_d}\right)^2 \quad (10)$$

仿真试验表明,电机控制系统的稳定运行对权重系数敏感度较低。因此,本文提出的权重系数确定方法可为模型预测转矩控制的权重系数初值的设定提供参考。

模型预测转矩控制系统将 7 个电压矢量代入式(1)和式(4),可得施加不同电压矢量下定子磁链幅值和转矩的预测值,再将其代入式(6),则可以得到 7 个不同的成本函数值。模型预测转矩控制最终选择成本函数最小值所对应的电压矢量作为下一时刻施加的电压矢量。模型预测转矩控制流程图如图 1 所示。

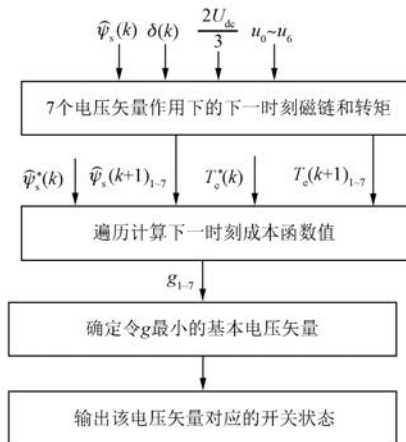


图 1 模型预测转矩控制流程图

基于 MATLAB/Simulink 建立了 SPMSM 模型的预测控制模型。其仿真模型为离散模型,采样周期为 5×10^{-5} s;直流母线电压为 312 V;参考转速初始值为 30 r/min,3 s 时阶跃至 -30 r/min;负载转矩初始值为 30 N·m,1 s 时阶跃至 10 N·m,2 s 时阶跃至 30 N·m;仿真总时长为 4 s。转速 PI 调节器参数为: $K_p = 5$ 、 $K_i = 10$;PI 调节器输出的上下限为 $[-35, 35]$ 。仿真用 SPMSM 参数如表 1 所示。

表 1 仿真用 SPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.2
d 轴电感/H	0.008 5
q 轴电感/H	0.008 5
转子磁链/Wb	0.175
极对数	4
转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.089
黏滞阻尼/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$)	0.005

在含权重系数的成本函数控制下,SPMSM 转速、电机转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹仿真波形分别如图 2~图 5 所示。

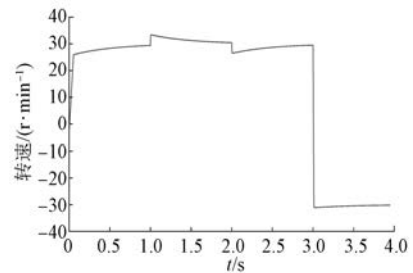


图 2 含权重系数的成本函数控制下电机转速仿真波形

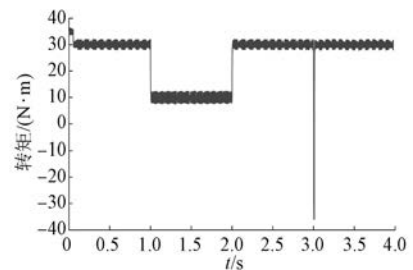


图 3 含权重系数的成本函数控制下电机转矩仿真波形

由图 2~图 5 可知,模型预测转矩控制系统运行良好,但在转速阶跃时,磁链出现较大波动。

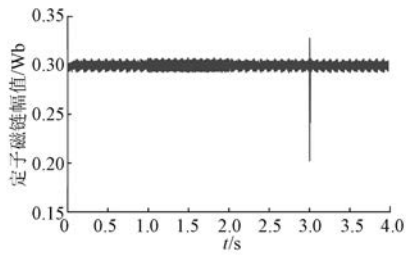


图 4 含权重系数的成本函数控制下定子磁链幅值仿真波形

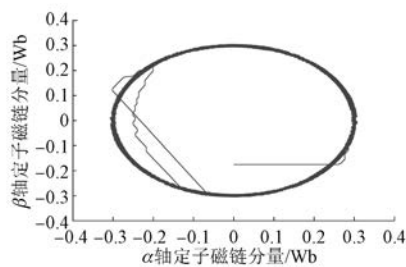


图 5 含权重系数的成本函数控制下定子磁链轨迹仿真波形

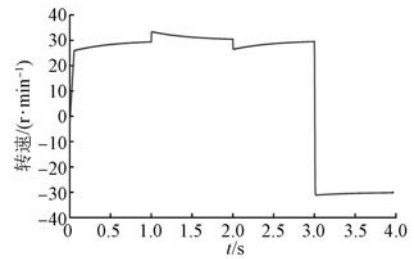


图 6 无需权重系数设定的成本函数控制下电机转速仿真波形

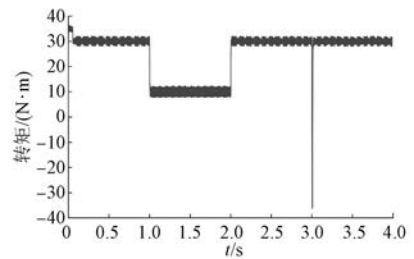


图 7 无需权重系数设定的成本函数控制下电机转矩仿真波形

2 无需权重系数设定的成本函数

成本函数需设定权重系数,对电机参数依赖性较大。可将磁链误差控制和转矩误差控制转换为磁链相对误差率控制和转矩相对误差率控制。由于磁链相对误差率控制和转矩相对误差率均是无量纲的物理量,且在同一数量级别上,成本函数可省去权重系数的设定,得:

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*} \right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*}{\hat{\psi}_s^*} \right]^2} \quad (11)$$

在无需权重系数设定的成本函数控制下,表面式永磁同步电机转速、电机转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹仿真波形分别如图 6~图 9 所示。

由图 6~图 9 可知,模型预测转矩控制系统运行状态良好。由于成本函数无需权重系数设定,实现更为简单,但在转速阶跃时,磁链波动较大。

3 含磁链约束项的成本函数

由图 3、图 4、图 7、图 8 可知,含权重系数和无

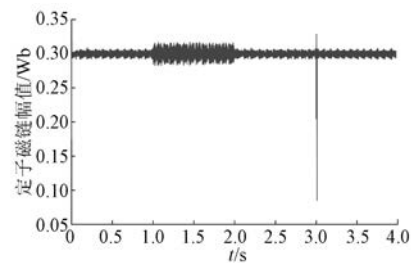


图 8 无需权重系数设定的成本函数控制下定子磁链幅值仿真波形

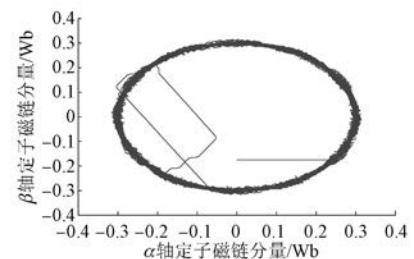


图 9 无需权重系数设定的成本函数控制下定子磁链轨迹仿真波形

需权重系数设定的成本函数均可较好地满足稳态下对转矩和磁链的控制。但当参考转速动态阶跃时,参考转矩也发生阶跃,使得成本函数中的转矩

控制分量长时间处于主导地位,则模型预测转矩控制弱化磁链控制,系统所选择的电压矢量仅满足对转矩的控制,从而造成了磁链较大的误差。在转矩动态变化下,为了抑制磁链较大的误差,成本函数应增加对磁链的约束项。由此,本文提出含磁链约束项的成本函数为

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*}\right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*}{\hat{\psi}_s^*}\right]^2} + g_f \quad (12)$$

其中: g_f 为磁链幅值约束项,表达式为

$$g_f = \begin{cases} 10\,000, & |\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*| > 0.02 \\ 0, & |\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*| \leq 0.02 \end{cases} \quad (13)$$

若预测磁链与实际磁链误差小于 0.02 Wb,磁链约束项为零,否则,磁链约束项取较大值。通过对磁链幅值的约束,模型预测转矩控制系统将避免选择引起较大磁链脉动的电压矢量。

在含磁链约束项的成本函数控制下,SPMSM 转速、电机转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹仿真波形分别如图 10~图 13 所示。

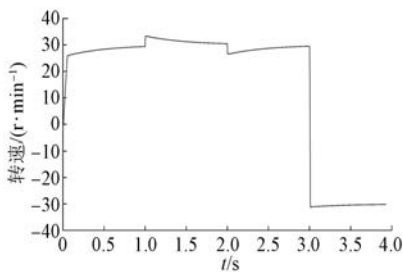


图 10 含磁链约束项的成本函数控制下电机转速仿真波形

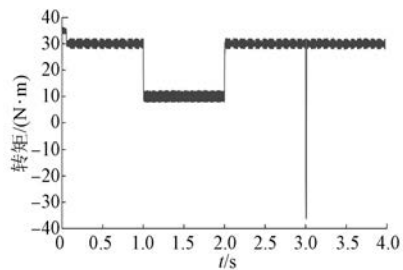


图 11 含磁链约束项的成本函数控制下电机转矩仿真波形

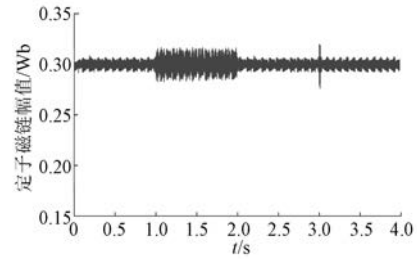


图 12 含磁链约束项的成本函数控制下定子磁链幅值仿真波形

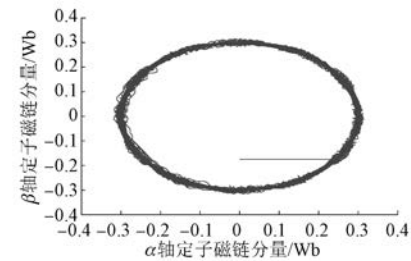


图 13 含磁链约束项的成本函数控制下定子磁链轨迹仿真波形

图 10~图 13 的仿真结果表明,模型预测转矩控制系统运行良好。由于成本函数增加了磁链约束项,在转矩动态变化下,可有效消除磁链中较大的脉动。

4 磁链约束取代磁链控制的成本函数

模型预测转矩控制中,转矩控制优先于磁链控制。因此,成本函数也可用磁链约束代替对磁链的精确控制,仅控制磁链在设定的滞环控制宽度范围内。由此,本文提出采用磁链约束取代磁链控制的成本函数为

$$g = \left| \frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*} \right| + g_f \quad (14)$$

其中,磁链幅值约束项 g_f 依然如式(13)所示。

在磁链约束取代磁链控制的成本函数控制下,SPMSM 转速、电机转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹仿真波形分别如图 14~图 17 所示。

图 14~图 17 的仿真结果表明,模型预测转矩控制系统可正常运行。虽然成本函数含磁链约束项,消除了转矩动态变化时磁链的波动,但转矩和磁链控制效果不及前 3 种成本函数。

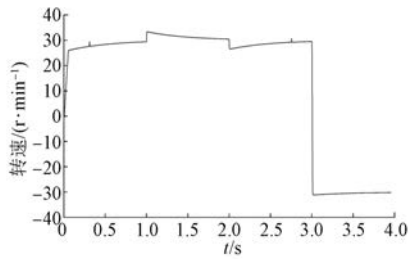


图 14 磁链约束取代磁链控制的成本函数控制下电机转速仿真波形

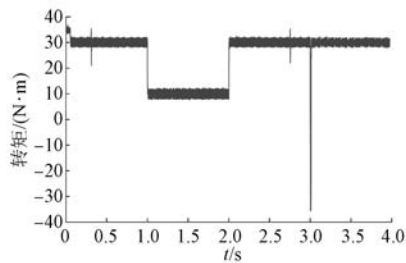


图 15 磁链约束取代磁链控制的成本函数控制下电机转矩

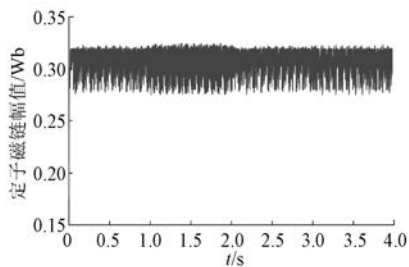


图 16 磁链约束取代磁链控制的成本函数控制下磁链幅值仿真波形

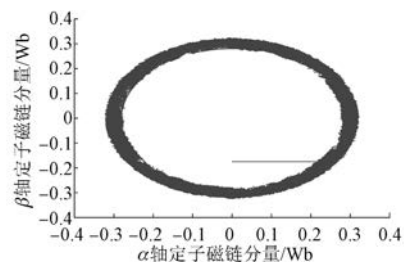


图 17 磁链约束取代磁链控制的成本函数控制下磁链轨迹仿真波形

5 性能比较

定义转矩脉动均方根 (RMSE)、磁链脉动

RMSE、评价函数平均值和平均开关频率分别为

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (15)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (16)$$

$$m_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left[\frac{\widehat{\psi}_s^* - \widehat{\psi}_s}{\widehat{\psi}_s^*} \right]^2 + \left[\frac{T_e^* - T_e}{T_e^*} \right]^2}}{n} \quad (17)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (18)$$

式中： n ——采样个数；

$N_{switching}$ ——逆变器开关总次数；

t ——仿真时长。

不同成本函数控制下,模型预测转矩控制系统性能如表 2 所示。

表 2 模型预测转矩控制系统性能

成本函数	转矩 RMSE/ (N·m)	磁链 RMSE/ Wb	评价函数 平均值	平均开关 频率/kHz
含权重系数	1.350 5	0.003 5	0.037 2	3.48
无需权重 系数设定	1.336 0	0.005 3	0.039 9	4.30
含磁链 约束项	1.490 7	0.003 6	0.040 9	4.35
磁链约束 取代磁链 控制	1.498 8	0.011 1	0.056 6	6.42

由表 2 和仿真波形可知,含权重系数与无需权重系数设定的成本函数控制性能基本相当,但前者需要电机参数实现对权重系数的设定。由于这 2 个成本函数不含磁链约束项,当转矩动态变化时,均会出现较大的磁链脉动。含磁链约束项的成本函数由于加入了磁链约束项,可以有效消除磁链脉动。采用磁链约束取代磁链控制的成本函数也可有效消除磁链脉动,但控制效果较差。

6 结 语

针对 SPMSM 模型预测转矩控制系统,本文

提出了一种均衡磁链控制和转矩控制的权重系数设计方法,并提出将磁链控制和转矩控制转换为相对误差率的成本函数,从而无需进行权重系数设计。仿真结果验证了以上 2 种成本函数运行效果良好,但前者对电机参数依赖性较强。由于这 2 种成本函数均不含磁链约束项,转矩动态下磁链出现较大的脉动,所以,本文提出了一种含磁链控制约束的成本函数,仿真结果表明其可有效消除磁链脉动。同时,本文还设计了使用磁链约束代替磁链控制的成本函数,虽也可有效消除磁链脉动,但控制效果弱于前 3 种成本函数。

【参考文献】

- [1] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4312.
- [2] RODRIGUEZ J, KENNEL R M, ESPINOZA J R, et al. High-performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 812.
- [3] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive control with finite control set for PMSM drive systems, Part 1: maximum torque per ampere operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1912.
- [7] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, Part 2: field weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 648.
- [8] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻, 等. 基于预测控制的 SPMSM 直接转矩控制最优电压矢量选择策略 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 21.
- [9] 李耀华, 任佳越, 师浩浩, 等. 表贴式永磁同步电机直接转矩控制变角度预测控制 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 19.
- [10] 李耀华, 任佳越. 表贴式永磁同步电机直接转矩控制变幅值预测控制研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 9.
- [11] 周雅夫, 张霖, 王翰涛, 等. 车用永磁同步电机 FCS-MPC 方法研究 [J]. 电力电子技术, 2019, 53(1): 42.
- [12] CORTES P, KOURO S, LA ROCCA B, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives [C] // Model 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 牛峰, 韩振铎, 黄晓艳, 等. 永磁同步电机模型预测磁链控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(3): 34.
- [16] 夏长亮, 仇旭东, 王志强, 等. 基于矢量作用时间的新型预测转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3045.
- [17] 张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4800.
- [18] 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.
- [19] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择区域 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(1): 95.
- [20] 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.

收稿日期: 2019-05-28