

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

李耀华,陈桂鑫,王孝宇,刘子焜,刘东梅,
任超.
表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制
系统预测模型研究.
电机与控制应用,2022,49(1):16.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制 系统预测模型研究*

李耀华, 陈桂鑫, 王孝宇, 刘子焜, 刘东梅, 任超
(长安大学汽车学院, 西安 710064)

摘要: 不同的磁链和转矩预测模型使得表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 模型预测转矩控制 (MPTC) 系统的性能有所差异。因此建立了基于转子磁链坐标系、定子磁链坐标系和静止坐标系的 SPMSM MPTC 系统, 并进行仿真验证和对比分析。仿真结果为 SPMSM MPTC 的预测模型的选择提供参考。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 转矩脉动; 开关频率

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)01-0016-06

doi: 10.12177/emca.2021.130

Research on Predictive Model of the SPMSM MPTC System*

LI Yaohua, CHEN Guixin, WANG Xiaoyu, LIU Zikun, LIU Dongmei, REN Chao
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The performances of surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) model predictive torque control (MPTC) systems are different in various stator flux and torque predictive models. The SPMSM MPTC systems based on rotor flux, stator flux and stationary coordinates are built. Simulation results provide references for the determination of predictive model for the SPMSM MPTC system.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); model predictive torque control (MPTC); torque ripple; switching frequency

0 引言

有限状态集永磁同步电机 (PMSM) 模型预测转矩控制 (MPTC) 充分利用逆变器开关状态离散有限的特点, 将备选电压矢量遍历代入磁链和转矩预测模型, 得到下一时刻的磁链和转矩, 并通过成本函数将磁链、转矩等控制目标柔性统一, 灵活实现多目标协同控制, 该控制方式受到了高度关注^[1-10]。

磁链和转矩预测模型作为 MPTC 的核心, 对系统的控制性能至关重要。根据表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 的磁链和转矩的预测模型建立方

法, 可分为基于转子坐标系的 MPTC^[11-12]、基于定子磁链坐标系的 MPTC^[13-15] 和基于静止坐标系的 MPTC^[16-17]。不同磁链和转矩预测模型下, SPMSM MPTC 系统的性能有所差异。本文建立了基于转子磁链坐标系、定子磁链坐标系和静止坐标系的 SPMSM MPTC 系统, 进行仿真验证和对比分析, 为 SPMSM MPTC 的选择提供参考。

1 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC

转子磁链坐标系下, SPMSM d 轴和 q 轴定子电压方程如式 (1) 和式 (2) 所示:

收稿日期: 2021-08-25; 收到修改稿日期: 2021-11-05

* 基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2021JM-163); 陕西省重点研发计划项目 (2019ZDLGY15-06, 2020GY-164)

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

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q i_q \omega_r \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + (L_d i_d + \psi_f) \omega_r \quad (2)$$

式中: u_d 和 u_q 为电机 d 轴和 q 轴定子电压; i_d 和 i_q 为电机 d 轴和 q 轴定子电流; R_s 为电机定子电阻; ψ_f 为电机永磁体磁链; ω_r 为电机电角速度; L_d 和 L_q 为电机 d 轴和 q 轴定子电感。对于 SPMSM, d 轴和 q 轴定子电感相等, 即定子电感 $L_s = L_d = L_q$ 。

由于采样频率较高, 由一阶欧拉前向离散公式可得下一时刻的定子 d 轴和 q 轴电流的预测值^[18], 如式(3)和式(4)所示:

$$i_d(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k) + \frac{T_s L_q}{L_d} \omega_r(k) i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k) \quad (3)$$

$$i_q(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k) - \frac{T_s L_d}{L_q} \omega_r(k) i_d(k) - \frac{T_s \psi_f}{L_q} \omega_r(k) + \frac{T_s}{L_q} u_q(k) \quad (4)$$

式中: T_s 为采样周期。

由下一时刻的定子 d 轴和 q 轴电流的预测值, 则可得下一时刻的定子磁链和转矩预测值, 如式(5)~式(8)所示:

$$\psi_d(k+1) = L_d i_d(k+1) + \psi_f \quad (5)$$

$$\psi_q(k+1) = L_q i_q(k+1) \quad (6)$$

$$\psi_s(k+1) = \sqrt{\psi_d^2(k+1) + \psi_q^2(k+1)} \quad (7)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3}{2} p [\psi_d(k+1) i_q(k+1) - \psi_q(k+1) i_d(k+1)] \quad (8)$$

式中: p 为极数。

由磁链和转矩预测模型可知, 下一时刻的定子磁链和转矩预测值由施加的电压矢量决定。两电平三相逆变器产生的备选电压矢量如式(9)所示^[19-20]:

$$\mathbf{u}_s \in \{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4, \mathbf{u}_5, \mathbf{u}_6\} \quad (9)$$

式中: 零电压矢量 $\mathbf{u}_0$ 可由两个开关状态 111 或 000 生成, 具体选择由开关次数最小原则来确定。

由于磁链和转矩量纲不同, 需要设计和调整权重系数^[21-22]。为了消除权重系数, 这里将磁链和转矩均转换为无量纲的磁链和转矩变化率, 设

计成本函数^[23]如式(10)所示:

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)}\right]^2 + \left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)}{\psi_s^*(k)}\right]^2} \quad (10)$$

式中: T_e^* 和 ψ_s^* 分别为当前时刻转矩和定子磁链幅值的参考值。

由此可得, 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统如图 1 所示。

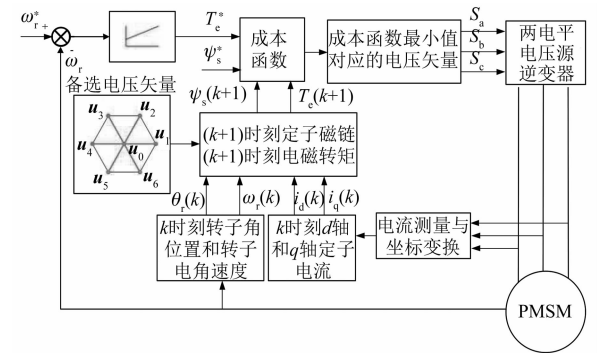


图 1 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMSM 模型预测控制系统仿真模型。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。转速 PI 调节器参数为 $K_p = 5, K_i = 100$, 输出上下限为 $[-30 \text{ N} \cdot \text{m}, 30 \text{ N} \cdot \text{m}]$ 。参考转速初始为 500 r/min, 2 s 时阶跃至 -500 r/min。负载转矩初始为 10 N·m, 1 s 时阶跃至 -10 N·m, 3 s 时阶跃至 10 N·m, 仿真总时长为 4 s。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。仿真用 SPMSM 参数如表 1 所示。

表 1 仿真用 SPMSM 参数

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

基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统仿真结果如图 2~图 4 所示。

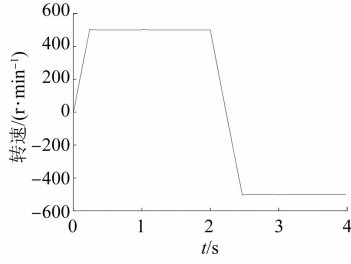


图2 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 电机转速

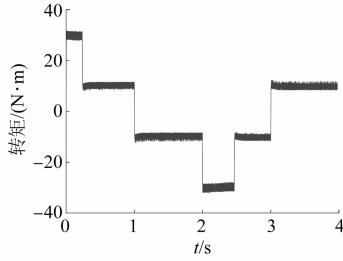
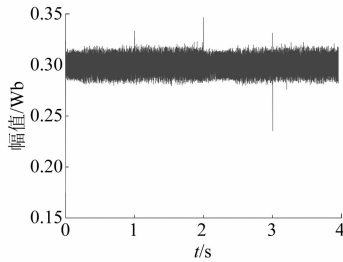


图3 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 电机转矩

图4 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC
定子磁链幅值

定义转矩脉动均方根误差 (RMSE)、磁链脉动均方根误差和平均开关频率 f_{ave} 分别如式(11)~式(13)所示:

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (11)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (12)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (13)$$

式中: n 为采样个数; $N_{switching}$ 为逆变器上下桥臂通断总次数; t 为仿真总时长。

基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统

控制性能如表 2 所示。

表2 基于转子磁链坐标系的电机系统控制性能

$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	ψ_{rip_RMSE}/Wb	f_{ave}/kHz
0.792 5	0.006 9	6.24

2 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC

SPMSM 定子磁链矢量和转矩如式(14)、式(15)所示:

$$\psi_s = \int (u_s - i_s R_s) dt \quad (14)$$

$$T_e = \frac{3p\psi_s\psi_f}{2L_d} \sin \delta \quad (15)$$

式中: ψ_s 、 u_s 和 i_s 分别为定子磁链矢量、施加电压矢量和定子电流矢量; δ 为转矩角, 即定子磁链与转子磁链夹角。

由式(14)可知, 忽略定子电阻压降, 施加电压矢量一个采样周期后, 定子磁链的变化如图 5 所示, 其中 α 为施加电压矢量与定子磁链的夹角, $\Delta\theta_s$ 为施加电压矢量引起的定子磁链角度变化。

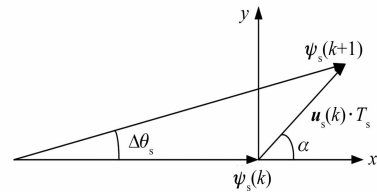


图5 定子磁链变化

由图 5 可知, 下一时刻定子磁链幅值和转矩角变化量如式(16)和式(17)所示:

$$\psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha} \quad (16)$$

$$\Delta\theta_s = \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha}} \quad (17)$$

式中: $\psi_s(k)$ 和 $u_s(k)$ 为当前时刻的定子磁链幅值和施加的电压矢量幅值; $q = \frac{u_s(k) \cdot T_s}{\psi_s(k)}$ 。

由于采样周期较小, 忽略转子运动对转矩角的影响, 则下一时刻的转矩角预测值如式(18)所示:

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

$$\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha}} \quad (18)$$

式中: $\delta(k)$ 为当前时刻的转矩角。

由式(18)可知, 确定下一时刻转矩角需确定当前时刻转矩角信息 $\delta(k)$ 。本文采用反解转矩方程以获得转矩角 $\delta(k)$, 如式(19)所示:

$$\delta(k) = \arcsin \frac{2L_d T_e(k)}{3p\psi_s(k)\psi_f} \quad (19)$$

将下一时刻定子磁链幅值和转矩角预测值代入至转矩方程, 则可得下一时刻的电机转矩预测值^[24-25], 如式(20)所示:

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_s(k+1)\psi_f}{2L_d} \sin \delta(k+1) = \frac{3p\psi_f\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha} \cdot \sin \left[\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha}} \right] \quad (20)$$

由此可得, 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统如图 6 所示。

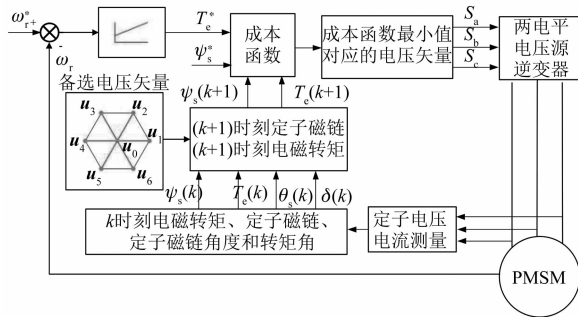


图 6 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统

相同备选电压集合、成本函数及仿真条件下, 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统仿真结果如图 7~图 9 所示。

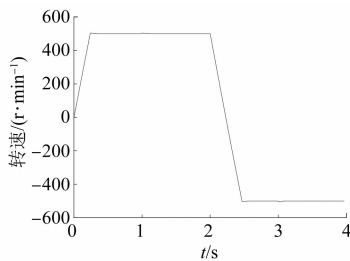


图 7 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 电机转速

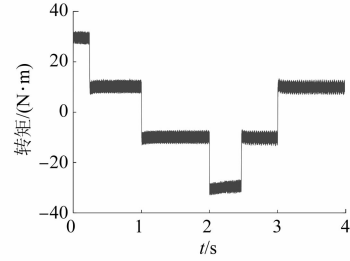


图 8 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 电机转矩

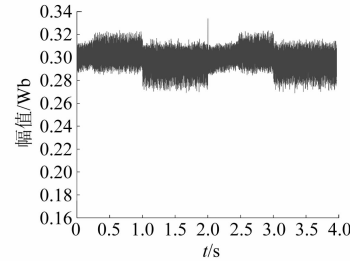


图 9 基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 定子磁链幅值

基于定子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 系统控制性能如表 3 所示。

表 3 基于定子磁链坐标系的电机系统控制性能

$T_{rip-RMSE}/(N \cdot m)$	$\psi_{rip-RMSE}/Wb$	f_{ave}/kHz
1.488 7	0.007 2	5.54

3 基于静止坐标系的 SPMSM MPTC

SPMSM 定子电压矢量和定子磁链矢量方程^[26]如式(21)、式(22)所示:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + \boldsymbol{\psi}_f \quad (22)$$

将式(21)代入至式(22)可得:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_f}{dt} = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + j\omega_r \boldsymbol{\psi}_f \quad (23)$$

由于采样频率较高, 同样采用一阶欧拉前向离散公式将式(23)离散化, 可得下一时刻定子电压矢量预测模型如式(24)所示:

$$\mathbf{i}_s(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) \mathbf{i}_s(k) +$$

$$\frac{T_s}{L_s}[\mathbf{u}_s(k) - j\omega_r(k)\boldsymbol{\psi}_f(k)] \tag{24}$$

由上文可知,下一时刻的定子磁链矢量预测模型如式(25)所示:

$$\boldsymbol{\psi}_s(k+1) = \boldsymbol{\psi}_s(k) + T_s \mathbf{u}_s(k) - T_s R_s \mathbf{i}_s(k) \tag{25}$$

基于下一时刻定子电流矢量和定子磁链矢量预测模型,SPMSM 下一时刻转矩预测模型如式(26)所示:

$$T_e(k+1) = \frac{3}{2}p[\boldsymbol{\psi}_s(k+1) \times \mathbf{i}_s(k+1)] \tag{26}$$

由此可得,基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 系统如图 10 所示。

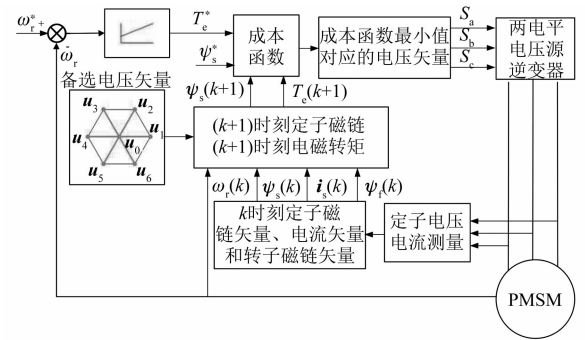


图 10 基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 系统

相同备选电压集合、成本函数及仿真条件下,基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 系统仿真结果如图 11~图 13 所示。

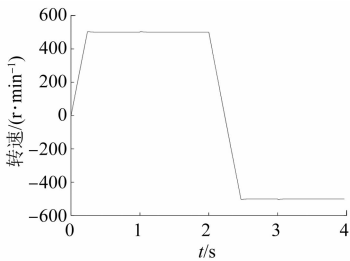


图 11 基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 电机转速

基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 系统控制性能如表 4 所示。

表 4 基于静止坐标系的电机系统控制性能		
$T_{rip-RMSE}/(N \cdot m)$	$\psi_{rip-RMSE}/Wb$	f_{ave}/kHz
1.367 4	0.007 2	5.55

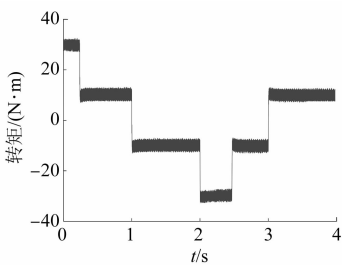


图 12 基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 电机转矩

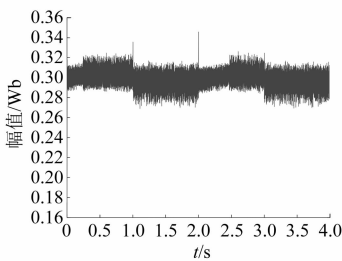


图 13 基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 定子磁链幅值

4 结 语

(1) 基于转子磁链坐标系、基于定子磁链坐标系和基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 可行,电机系统可实现四象限运行。

(2) 不同磁链和转矩预测模型对磁链和转矩的计算有所差异,导致 SPMSM MPTC 系统控制性能不同。基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 性能较优,但平均开关频率较高。基于定子磁链坐标系和静止坐标系的 SPMSM MPTC 性能基本相当,转矩脉动较大,但平均开关频率较低。

(3) 基于转子磁链坐标系的 SPMSM MPTC 需要转子实时位置和旋转坐标变换以获得电机定子 d,q 轴电流分量。基于定子磁链坐标系和基于静止坐标系的 SPMSM MPTC 可不依赖转子位置实现,从而减小对转子实时位置信息的依赖。

【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] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control: a simple and powerful method to control power converters [J]. IEEE Transactions on

- Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1826.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] RODRIGUEZ J, CORTES P. 功率变换器和电气传动的预测控制 [M]. 陈一民, 周京华, 卫三民, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [8] 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.
- [9] 朱芮, 吴迪, 陈继峰, 等. 电机系统模型预测控制研究综述 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 1.
- [10] 李耀华, 刘子焜, 刘东梅, 等. 永磁同步电机直接转矩控制与模型预测转矩控制比较研究 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 18.
- [11] 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.
- [12] 杜承东, 聂子玲, 李忠瑞. 一种基于模型预测的永磁同步电机直接转矩控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 1.
- [13] 李耀华, 苏锦仕, 秦辉, 等. 永磁同步电机有限状态集模型预测转矩控制系统研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(12): 8.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 雷亚洲, 徐艳平, 周钦. 基于改进模型预测控制的永磁同步电机 DTC 方法 [J]. 电气传动, 2015, 45(9): 3.
- [17] 徐艳平, 周钦, 雷亚州, 等. 永磁同步电机改进占空比模型预测转矩控制方法 [J]. 电气传动, 2017, 47(5): 14.
- [18] 颜学龙, 谢刚, 孙天夫, 等. 基于模型预测控制的永磁同步电机电流控制技术综述 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 1.
- [19] 李耀华, 曲亚飞, 师浩浩, 等. 一种基于开关次数最小的含零电压矢量永磁同步电机直接转矩控制开关表 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 34.
- [20] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞, 等. 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.
- [21] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 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 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 电动汽车用永磁同步电机驱动系统控制策略比较研究 [J]. 汽车工程, 2013, 35(5): 413.
- [26] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.