

基于电压矢量利用率的永磁同步电机模型预测 转矩控制备选电压矢量集合*

李耀华, 杨启东, 苏锦仕, 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: 传统模型预测控制(MPC)采用电压源逆变器(VSI)生成的全部7个电压矢量作为备选电压矢量集合,造成较大的运算负担。不同条件下,模型预测转矩控制(MPTC)系统对7个电压矢量的实际利用率并不均衡。在考虑定子磁链扇区、磁链和转矩控制信号和转矩角条件下,分析了表贴式永磁同步电机(SPMSM)MPTC系统对7个备选电压矢量的实际利用情况,并基于电压矢量利用率规律,提出了可动态变化的备选电压矢量集合。仿真结果表明与传统备选电压矢量集合相比,所提备选电压矢量集合可在保持控制性能基本相当的同时,减小备选电压矢量个数,有效提高系统实时性能。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 备选电压矢量; 计算负担

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0010-08

doi: 10.12177/emca.2019.190

Candidate Voltage Vector Sets Used in Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Utilization Rate of Voltage Vectors*

LI Yaohua, YANG Qidong, SU Jinshi, REN Jiayue, QIN Yugui,
ZHAO Chenghui, ZHOU Yifan

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Traditional model predictive control (MPC) uses all 7 voltage vectors generated by voltage source inverter (VSI) as candidate voltage vectors, which results in heavy calculation burden. But traditional model predictive torque control (MPTC) does not utilize 7 voltage vectors equally under some conditions. The MPTC system for surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is built. Considering different stator flux sectors, flux and torque control commands and torque angles, the utilization rate of 7 voltage vectors is studied. Based on the principle of utilization rate of voltage vectors, simplified candidate voltage vector sets are proposed which can dynamically adjust candidate voltage vectors. Simulation results show that compared with traditional candidate voltage vectors sets, the proposed sets maintain the performance equivalently and decrease the number of candidate voltage vectors, and therefore can improve the real-time performance of the system.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); model predictive torque control (MPTC); candidate voltage vectors; calculation burden

收稿日期: 2019-12-15; 收到修改稿日期: 2020-03-03

* 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项目(300102228201)

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。

0 引言

有限状态集模型预测控制技术(FCS-MPC)利用变换器开关状态有限的特点,基于控制系统预测模型,遍历所有可能的开关状态,选择令成本函数最小的开关状态作为输出,成为永磁同步电机(PMSM)控制领域研究的热点之一^[1-13]。传统MPC在每个控制周期内均需要完成多次预测运算,具体次数由变换器所有可能开关状态决定。两电平电压源逆变器可产生6个非零电压矢量 $U_1 \sim U_6$ 和1个零电压矢量 U_0 。因此,模型预测转矩控制(MPTC)每次需进行7次预测计算和遍历寻优,计算量较大。对于可产生更多开关状态的多电平变换器、矩阵变换器,计算量将更大。因此,减少备选电压矢量对减小运算负担、提高系统实时性有较大意义。文献[14-15]从减小开关次数的角度出发,减少了部分备选电压矢量,但并未考虑对系统性能的影响。文献[16-17]基于电压矢量作用对磁链和转矩的增减作用,给出简化的备选电压矢量集合,但不能保证所选择的备选电压矢量实际是MPC使用频率较高的电压矢量。

本文分析了表贴式永磁同步电机(SPMSM)MPTC系统对备选电压矢量的实际利用情况,并基于电压矢量利用率规律,提出了可动态变化的备选电压矢量集合。仿真结果表明:与传统备选电压矢量集合相比,本文提出的备选电压矢量集合可在保持控制性能基本相当的同时,减小备选电压矢量个数,有效提高了系统实时性能。

1 定子磁链坐标系下MPTC

在定子磁链坐标系下,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 $\delta(k+1)$ 可表示为

$$\hat{\psi}_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \quad (1)$$

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

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

其中: $q = \frac{\hat{U}_s(k) \cdot \Delta t}{\hat{\psi}_s(k)}$; $\hat{\psi}_s(k)$ 、 $\hat{U}_s(k)$ 、 $\delta(k)$ 分别为

当前时刻的定子磁链、施加的电压矢量和转矩角; 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^[18-19]。

由SPMSM转矩方程可知,下一时刻的电机转矩可表示为

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

将式(1)和式(2)代入式(3),可得下一时刻电机转矩:

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

由式(1)和式(4)的预测模型即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。

传统MPTC的备选电压矢量集合为

$$U_s \in \{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\} \quad (5)$$

式中: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。零电压矢量可由2个开关状态(111或000)生成,具体选择以开关次数最小为原则^[20-21]。

成本函数是MPTC选择电压矢量的唯一标准。综合考虑磁链控制和转矩控制,定义成本函数 g :

$$g = \sqrt{\left(\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\psi}_s(k+1) - \hat{\psi}_s^*}{\hat{\psi}_s^*}\right)^2} \quad (6)$$

式中: $T_e(k+1)$ 、 $\hat{\psi}_s(k+1)$ 分别为下一时刻预测得出的转矩和定子磁链值; T_e^* 和 $\hat{\psi}_s^*$ 分别为下一时刻转矩和定子磁链的参考值^[22]。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。

MPTC系统将7个电压矢量代入式(1)和式(4),则可得到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),则可得到7个不同的成本函数值。MPTC最终选取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。MPTC流程图如图1所示。

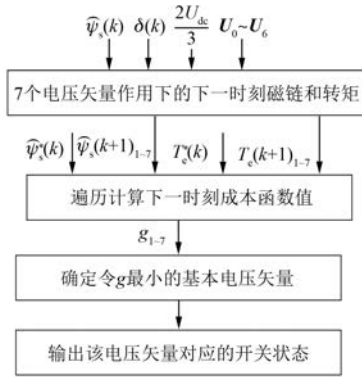


图1 MPTC流程图

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMSM MPTC 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: $K_p = 5$, $K_i = 10$, PI 调节器输出上下限为 $[-35, 35]$ 。参考转速为 60 r/min,负载转矩为 18 N·m,对应转矩角为 29° 。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb,仿真总时长为 2 s。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

SPMSM MPTC 转速、转矩、转矩角、定子磁链幅值及定子磁链轨迹分别如图 2~图 6 所示。

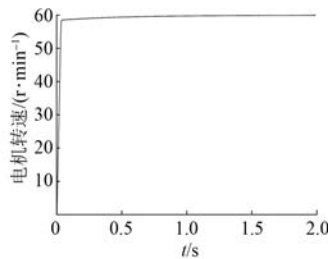


图2 SPMSM MPTC 转速

仿真结果表明,SPMSM MPTC 性能良好。

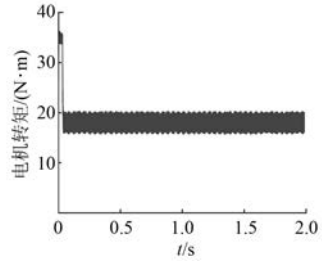


图3 SPMSM MPTC 电机转矩

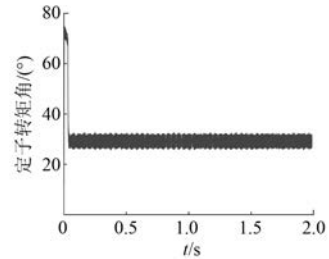


图4 SPMSM MPTC 转矩角

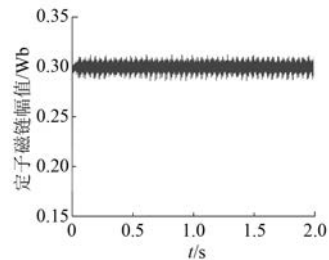


图5 SPMSM MPTC 定子磁链幅值

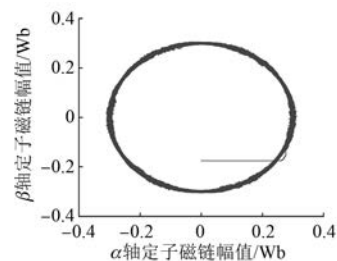


图6 SPMSM MPTC 定子磁链轨迹

2 电压矢量利用率分析

上文基于 7 个备选电压矢量的 MPTC 性能良好,但系统在每个采样周期需要将 7 个备选电压矢量代入遍历计算,对系统实时性要求较高。对于多电平变换器、矩阵变换器等备选电压矢量数目更多的装置,系统运算负担将会更大。因此,需

要在保证系统性能的前提下,对备选电压矢量集合进行精简优化。

定义电压矢量利用率:

$$\eta_i = \frac{N_i}{N} \times 100\%, i = 0 \sim 6 \quad (7)$$

式中: N 为某时间段内模型预测转矩控制施加电压矢量的总次数,即采样总次数; N_i 为具体某个电压矢量的施加总次数。

在上文仿真条件下,不同定子磁链扇区 ($\theta_1 \sim \theta_6$) 内 7 个电压矢量 ($U_0 \sim U_6$) 的利用率如表 2 所示。定子磁链扇区 $\theta_1 \sim \theta_6$ 和电压矢量 $U_0 \sim U_6$ 如图 7 所示。

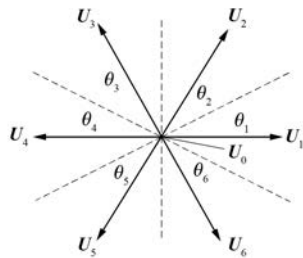


图 7 定子磁链扇区 $\theta_1 \sim \theta_6$ 和电压矢量 $U_0 \sim U_6$

表 2 电压矢量利用率 %

电压矢量	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
U_0	37.59	40.44	38.68	43.36	38.39	38.90
U_1	2.22	13.47	11.74	2.14	15.94	14.38
U_2	15.32	2.52	14.00	10.15	2.18	16.68
U_3	16.25	14.25	2.32	12.93	12.02	2.20
U_4	2.05	15.82	15.06	2.76	13.90	11.29
U_5	12.50	2.18	15.88	12.96	2.36	14.17
U_6	14.06	11.30	2.32	15.69	15.21	2.38

表 2 表明在一个定子磁链扇区内,7 个电压矢量的利用率极不均衡。在定子磁链扇区 θ_1 , 电压矢量 U_1 和 U_4 的利用率较低,均小于 5%,对系统性能影响较小。根据定子磁链扇区和电压矢量的对应关系,定子磁链扇区 θ_1 的结论可递推至其他扇区。

电压矢量利用率还与定子磁链幅值和转矩的增减控制信号有关。增加考虑磁链和转矩的增减控制信号判定约束,不同定子磁链扇区下 7 个电压矢量利用率如表 3~表 6 所示。其中,转矩滞环宽度为 $0.02 \text{ N} \cdot \text{m}$,磁链滞环宽度为 0.002 Wb 。

表 3 电压矢量利用率(增加磁链,增加转矩) %

电压矢量	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
U_0	33.56	34.98	34.16	37.15	34.38	35.12
U_1	8.29	0.46	0	0	17.31	36.80
U_2	40.41	8.55	0.53	0	0	18.83
U_3	17.19	36.82	8.14	0.53	0	0
U_4	0	19.20	38.36	9.86	0.49	0
U_5	0	0	18.81	34.58	8.38	0.60
U_6	0.55	0	0	17.88	39.43	8.65

表 4 电压矢量利用率(增加磁链,减小转矩) %

电压矢量	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
U_0	39.76	39.82	40.26	47.57	38.76	39.84
U_1	0.64	40.56	17.16	0	0.39	0
U_2	0	1.33	41.35	14.80	0	0.29
U_3	0	0	1.01	36.22	17.87	0
U_4	0	0.30	0	1.22	41.85	16.89
U_5	18.79	0	0.22	0	1.12	42.20
U_6	40.82	17.99	0	0.20	0	0.78

表 5 电压矢量利用率(减小磁链,增加转矩) %

电压矢量	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
U_0	38.08	42.38	39.16	42.06	37.44	39.26
U_1	0	0.25	0	0.67	41.84	18.27
U_2	18.70	0	0	0	0.97	41.67
U_3	42.24	17.46	0	0	0	0.80
U_4	0.79	39.47	19.58	0	0	0
U_5	0	0.44	40.56	16.13	0	0
U_6	0.18	0	0.70	41.14	19.75	0

表 6 电压矢量利用率(减小磁链,减小转矩) %

电压矢量	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
U_0	39.10	44.76	41.41	47.04	43.18	41.66
U_1	0	16.36	31.96	8.18	0.82	0
U_2	0	0	17.05	27.44	7.83	1.54
U_3	0.60	0	0	16.71	32.01	8.52
U_4	8.01	0.57	0	0	16.16	31.30
U_5	34.83	8.57	0.71	0	0	16.97
U_6	17.45	29.75	8.88	0.62	0	0

由表 3~表 6 可知,在定子磁链扇区 θ_1 内,当增加磁链、增加转矩时,利用率相对较高的电压矢量为 $\{U_0, U_1, U_2, U_3\}$; 当增加磁链、减小转矩时,利用率相对较高的电压矢量为 $\{U_0, U_5, U_6\}$; 当减小磁链、增加转矩时,利用率相对较高的电压矢量为 $\{U_0, U_2, U_3\}$; 当减小磁链、减小转矩时,利用率相对较高的电压矢量为 $\{U_0, U_4, U_5, U_6\}$ 。由此可递推得到其他定子磁链扇区内利用率相对较高的备选电压矢量集合。

由转矩预测模型可知,电压矢量对转矩的作用与转矩角有关,因此转矩角也会影响电压矢量的利用率。

为了验证转矩角对电压矢量利用率的影响,本文设置了10种大小不同的负载转矩(4.5、8.0、11.0、14.2、18.0、22.0、25.5、28.5、31.2、33.0 N·m),分别对应不同的转矩角(7.0°、12.5°、17.3°、22.6°、29.2°、36.5°、43.6°、50.4°、57.5°、63.2°)。以定子磁链 θ_1 为例,不同转矩角下电压矢量 $U_0 \sim U_6$ 在定子磁链扇区 θ_1 内的利用率如表7所示。

表7 定子磁链扇区 θ_1 内电压矢量利用率 %

转矩角	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
7.0°	26.93	11.19	14.41	13.47	10.58	12.05	11.37
12.5°	30.52	7.37	13.89	15.78	7.38	10.83	14.23
17.3°	35.89	6.09	11.62	17.10	5.80	8.14	15.36
22.6°	37.17	4.28	11.66	18.06	3.69	9.42	15.72
29.2°	37.59	2.22	15.32	16.25	2.05	12.50	14.06
36.5°	42.66	1.43	13.85	16.44	1.21	10.22	14.19
43.6°	51.76	0.95	12.06	14.05	1.04	7.95	12.18
50.4°	58.22	0.74	10.52	12.78	0.57	6.41	10.76
57.5°	62.88	0.74	8.89	12.24	0.19	4.89	10.17
63.2°	66.27	0.56	8.27	11.30	0.09	4.07	9.45

由表7可知,定子磁链扇区 θ_1 内,当转矩角 $\delta < 20^\circ$ 时,7个基本电压矢量的利用率均较高;当转矩角 $\delta \geq 20^\circ$ 时,电压矢量 $U_0、U_2、U_3、U_5、U_6$ 的利用率较高。由此可递推得到其他定子磁链扇区利用率较高的备选电压矢量集合。

增加考虑磁链和转矩的增减控制信号判定约束,不同转矩角下电压矢量 $U_0 \sim U_6$ 在定子磁链扇区 θ_1 内的利用率如表8~表11所示。

表8 定子磁链扇区 θ_1 内电压矢量利用率 (增加磁链,增加转矩) %

转矩角	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
7.0°	19.73	18.28	34.20	22.01	5.79	0	0
12.5°	25.90	15.76	33.47	23.19	1.60	0	0.07
17.3°	29.97	17.66	29.77	22.12	0.27	0	0.20
22.6°	34.76	15.76	27.92	21.42	0	0	0.14
29.2°	33.56	8.29	40.41	17.19	0	0	0.55
36.5°	40.96	5.06	35.96	17.14	0	0	0.88
43.6°	48.02	3.01	31.43	16.20	0	0	1.34
50.4°	53.43	2.54	25.73	15.31	0	0	2.99
57.5°	55.68	2.84	19.88	14.27	0	0	7.33
63.2°	56.97	2.15	18.10	13.28	0	0	9.51

表9 定子磁链扇区 θ_1 内电压矢量利用率 (增加磁链,减小转矩) %

转矩角	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
7.0°	25.65	17.90	0	0	4.36	17.63	34.46
12.5°	31.46	9.39	0	0	1.69	10.91	46.55
17.3°	33.41	4.82	0	0.16	1.34	10.11	50.16
22.6°	34.70	1.41	0	0	0.22	14.19	49.48
29.2°	39.76	0.6	0	0	0	18.79	40.82
36.5°	44.21	0.63	0.07	0.21	0	14.30	40.59
43.6°	50.81	0.63	0	0.28	0	12.03	36.24
50.4°	57.07	0.23	0.31	0.61	0	11.67	30.11
57.5°	59.81	0	0.65	0.65	0	12.52	26.36
63.2°	65.74	0	0.61	0.52	0	9.76	23.37

表10 定子磁链扇区 θ_1 内电压矢量利用率 (减小磁链,增加转矩) %

转矩角	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
7.0°	36.36	7.48	20.27	25.53	10.37	0	0
12.5°	36.32	3.41	19.00	33.43	7.85	0	0
17.3°	40.55	1.81	14.26	39.77	3.61	0	0
22.6°	38.04	0.24	16.56	44.21	0.95	0	0
29.2°	38.08	0	18.70	42.24	0.79	0	0.18
36.5°	39.77	0	17.03	42.34	0.61	0	0.25
43.6°	52.81	0	13.39	33.62	0.19	0	0
50.4°	61.28	0	11.79	26.81	0.12	0	0
57.5°	69.15	0	10.45	20.40	0	0	0
63.2°	73.01	0	9.73	17.21	0	0.05	0

表11 定子磁链扇区 θ_1 内电压矢量利用率 (减小磁链,减小转矩) %

转矩角	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
7.0°	21.88	4.64	0	0.20	19.90	34.49	18.88
12.5°	27.32	1.90	0	0.56	17.68	34.93	17.61
17.3°	38.80	0.21	0	0.42	18.10	24.37	18.10
22.6°	41.06	0	0	0.22	14.27	26.14	18.32
29.2°	39.10	0	0	0.60	8.01	34.83	17.45
36.5°	46.46	0	0	1.22	4.64	29.96	17.72
43.6°	56.05	0	0.16	1.95	4.53	23.19	14.13
50.4°	61.31	0	0.47	3.62	2.44	17.42	14.74
57.5°	64.34	0	0.16	6.81	0.88	12.02	15.79
63.2°	67.26	0	0	8.81	0.44	11.12	12.37

由表8~表11可知,定子磁链扇区 θ_1 内,当增加磁链、增加转矩时, $\delta < 45^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 $U_0、U_1、U_2、U_3$; $\delta \geq 45^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 $U_0、U_2、U_3、U_6$ 。当增加磁链、减小转矩时, $\delta < 15^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 $U_0、U_1、U_4、U_5、U_6$; $\delta \geq 15^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 $U_0、U_5、$

U_6 。当减小磁链、增加转矩时, $\delta < 15^\circ$, 电压矢量利用率较高的电压矢量为 U_0, U_1, U_2, U_3, U_4 ; $\delta \geq 15^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 U_0, U_2, U_3 。当减小磁链、减小转矩时, $\delta < 45^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 U_0, U_4, U_5, U_6 ; $\delta \geq 45^\circ$, 利用率较高的电压矢量为 U_0, U_3, U_5, U_6 。由此可递推得到其他定子磁链扇区利用率较高的备选电压矢量集合。

3 基于电压矢量利用率备选电压矢量集合

根据不同转矩角下的电压矢量利用率, 本文给出一种基于转矩角动态调整的备选电压矢量集合, 定义为备选电压矢量集合 1。具体为定子磁链扇区 θ_1 内, $\delta < 20^\circ$, 备选电压矢量集合为 7 个基本电压矢量; $\delta \geq 20^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_2, U_3, U_5, U_6\}$ 。其余定子磁链扇区内的备选电压矢量集合可类推得出。备选电压矢量集合 1 的确定需要定子磁链扇区位置和转矩角信息, 平均备选电压矢量为 6 个。

根据不同转矩角、磁链、转矩的增减控制信号条件下的电压矢量利用率, 本文给出一种基于转矩角、磁链、转矩的增减控制信号条件动态调整的备选电压矢量集合, 定义为备选电压矢量集合 2。具体为定子磁链扇区 θ_1 内, 当增加磁链、增加转矩时, $\delta < 45^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_1, U_2, U_3\}$; $\delta \geq 45^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_2, U_3, U_6\}$ 。当增加磁链、减小转矩时, $\delta < 15^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_1, U_4, U_5, U_6\}$; $\delta \geq 15^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_5, U_6\}$ 。当减小磁链、增加转矩时, $\delta < 15^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4\}$; $\delta \geq 15^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_2, U_3\}$ 。当减小磁链、减小转矩时, $\delta < 45^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_4, U_5, U_6\}$; $\delta \geq 45^\circ$, 备选电压矢量集合为 $\{U_0, U_3, U_5, U_6\}$ 。其余定子磁链扇区内的备选电压矢量集合可类推得出。备选电压矢量集合 2 的确定需要定子磁链扇区位置、磁链和转矩增减控制和转矩角信息, 平均备选电压矢量为 4 个。

对 FCS-MPTC 在传统备选电压矢量集合 ($U_0 \sim U_6$)、备选电压矢量集合 1、备选电压矢量集合 2 控制下进行仿真试验。设置负载转矩初始为

$5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 2 s 时阶跃至 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$, 4 s 时阶跃至 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$, 6 s 时阶跃至 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$, 8 s 时阶跃至 $25 \text{ N} \cdot \text{m}$, 10 s 时阶跃至 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$, 仿真总时长为 12 s, 其余仿真条件与上文相同。

在传统备选电压矢量集合控制下, 电机转矩和定子磁链幅值波形如图 8、图 9 所示。

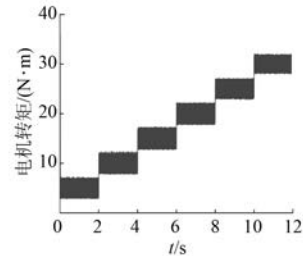


图 8 传统备选电压矢量集合控制下电机转矩

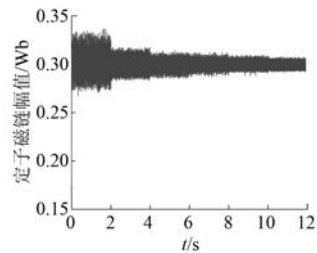


图 9 传统备选电压矢量集合控制下定子磁链幅值

在备选电压矢量集合 1 控制下, 电机转矩和定子磁链幅值波形如图 10、图 11 所示。

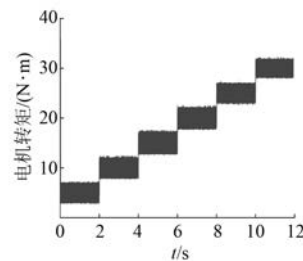


图 10 备选电压矢量集合 1 控制下电机转矩

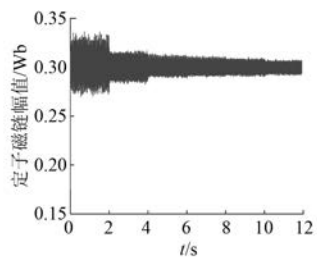


图 11 备选电压矢量集合 1 控制下定子磁链幅值

在备选电压矢量集合 2 控制下,电机转矩和定子磁链幅值波形如图 12、图 13 所示。

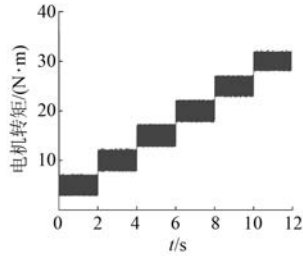


图 12 备选电压矢量集合 2 控制下电机转矩

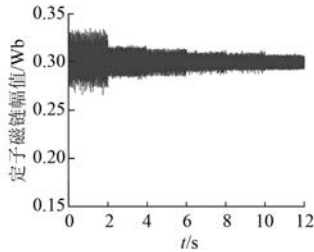


图 13 备选电压矢量集合 2 控制下定子磁链幅值

仿真结果表明,备选电压矢量集合 1 和集合 2 均可满足系统控制要求,系统运行良好。

定义转矩脉动均方根误差 (RMSE)、磁链脉动 RMSE、评价函数平均值和平均开关频率,可分别表示为

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (9)$$

$$m_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s}{\hat{\psi}_s^*}\right)^2 + \left(\frac{T_e^* - T_e}{T_e^*}\right)^2}}{n} \quad (10)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (11)$$

式中: n 为采样个数; $N_{switching}$ 为逆变器开关总次数, t 为仿真时长。

在传统备选电压矢量集合、备选电压矢量集合 1 和备选电压矢量集合 2 控制下,转矩脉动 RMSE、磁链脉动 RMSE、评价函数平均值、平均开关频率如表 12 所示。

表 12 不同备选电压矢量集合控制下仿真结果

备选电压 矢量集合	转矩脉动 RMSE/(N·m)	磁链脉动 RMSE/Wb	评价函数 平均值	平均开关 频率/kHz
传统集合	0.998 7	0.005 2	0.069 0	5.7
集合 1	1.048 9	0.005 2	0.720 4	6.0
集合 2	1.003 5	0.005 2	0.068 8	5.6

表 12 表明备选电压矢量集合 1 和集合 2 与采用全部 7 个基本电压矢量的传统备选电压矢量集合控制性能基本相当,但备选电压矢量集合 1 平均需进行 6 次预测计算,备选电压矢量集合 2 平均仅需进行 4 次预测计算,减少了预测计算次数,提高了系统的实时性能。与备选电压矢量集合 1 相比,备选电压矢量集合 2 选择针对性更强,选择利用率更高的电压矢量,平均预测计算次数更少,控制效果更好。

4 结 语

本文研究了 SPMSM MPC 系统的电压矢量利用率,提出基于电压矢量利用率对 MPC 备选电压矢量集合进行精简优化,并根据电压矢量利用率规律提出了可动态变化的备选电压矢量集合。仿真结果表明:与传统备选电压矢量集合相比,本文提出的备选电压矢量集合可在保持控制性能基本相当的同时,减少预测运算次数,提高系统实时性能。

【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] RODURGUZE 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] GEYER T, PAPAFOIOTOU G, MORARI M. Model predictive control-part I: concept, algorithm, and analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1894.
- [7] 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.
- [8] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive control with finite control set for PMSM drive systems, part 2: field weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 648.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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幅值预测控制研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 9.
- [12] 李耀华, 孟祥臻, 师浩浩, 等. 基于双变量预测控制的表贴式永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 15.
- [13] 李耀华, 苏锦仕, 秦辉, 等. 永磁同步电机有限控制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] 王伟光, 李伟. 基于 MTPA 的永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 3.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表贴式永磁同步电机有限状态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.

《电机与控制应用》新网站启用

为了更好地服务于作者和读者,《电机与控制应用》建设了新的网站。服务升级,内容丰富,域名不变,仍为 www.motor-abc.cn。

新网站设有网刊系统。2018 年至今《电机与控制应用》发表的所有论文均可通过该系统检索、阅读、下载。

在新网站的投稿系统中,作者可以在线投稿、查询审稿进度、察看修改意见并修改稿件,专家无需下载论文即可在线审稿。作者和专家可在相应的登录界面注册后进入系统。如果您的邮箱已被注册,则请使用"忘记密码"按钮重置密码。进入系统后可进行完善个人信息、修改密码、处理稿件等操作。

新网站同时开通了移动版。关注《电机与控制应用》微信公众号(djykyzy),即可在移动端阅读最新论文、查询稿件处理状态,并可登录投稿系统进行其他操作。

请扫码关注《电机与控制应用》微信公众号:

