

永磁同步电机模型预测转矩控制共模电压抑制研究

李耀华*, 邓益志, 张鑫泉, 童瑞齐
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

Research on Suppression Common-Mode Voltage of MPTC for PMSM

LI Yaohua*, DENG Yizhi, ZHANG Xinquan, TONG Ruiqi
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the problem of large common-mode voltage in model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor, the common-mode voltage suppression effectiveness of three methods, namely, joint control of flux linkage, torque and common mode voltage, direct removal of zero voltage vector and virtual zero voltage vector, is analyzed comparatively. Simulation results show that all three methods can effectively suppress the common-mode voltage. The first two methods do not use zero voltage vector, resulting in increased flux linkage ripple and torque ripple. Virtual zero voltage vector method retains the zero voltage vector and effectively suppresses the common-mode voltage, but the switching frequency increases. Adaptive dynamic virtual zero voltage vector method selects the zero voltage vector generation method with the smallest number of switching times, which can effectively reduce the switching frequency under the premise of the basically equivalent control performance, with the optimal overall performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive torque control; common-mode voltage; virtual zero voltage vector

摘 要: 针对永磁同步电机模型预测转矩控制共模电压较大的问题,对比分析了磁链、转矩和共模电压共同控制、直接去除零电压矢量和虚拟零电压矢量三种抑制共模电压的方法。仿真结果表明,三种方法均可有效抑制共模电压。前两种方法均未采用零电压矢量,导致磁链脉动和转矩脉动增大;虚拟零电压矢量方法既保留了零电压矢量,又有效抑制了共模电压,但开关频率有所增大;动态虚拟零电压矢量选择开关次数最小的零电压矢

量生成方式,可在控制性能基本相当的前提下,有效减小开关频率,综合性能最优。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 共模电压; 虚拟零电压矢量

0 引言

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 因具备控制性能优越、结构简单和抗干扰能力强等特点,成为永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 控制领域的研究热点^[1-2]。MPC 的控制系统会产生较大的共模电压,损坏绕组绝缘和电机轴承,影响电机的使用寿命^[3]。而且共模电压还会产生高频振荡的共模电流,带来电磁干扰问题,影响电子设备的正常运行^[4-5]。文献[6-8]在 MPC 的成本函数中加入共模电压控制项来抑制共模电压,但带来了权重系数的设计与调整问题。文献[9]采用变异系数法在线调节成本函数中控制目标的权重,但计算较为复杂。由于零电压矢量对应的共模电压较大,文献[10-11]采用不含零电压矢量的备选电压矢量集合来抑制共模电压,但与传统 MPC 相比,系统的控制性能有所下降。为了减小舍弃零电压矢量的影响,文献[12]采用非零基本电压矢量来合成虚拟零电压矢量,减少了因弃用零电压矢量造成的转矩和电流脉动。

本文基于表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制 (Model Predictive Torque Control, MPTC) 系统,对比了磁链、转矩和共模电压共同控制、直接去除零电压矢量和虚拟零电压矢量三种方法对共模电压的抑制效果,并采用自适应动态生成虚拟

基金项目: 西安市碑林区科技计划项目 (GX2252)

Science and Technology Program Project of Beilin District,
Xi'an (GX2252)

零电压矢量来减少开关频率。仿真结果表明,以上三种方法均可有效抑制共模电压,前两种方法的磁链和转矩脉动较大,虚拟零电压矢量方法开关频率较高。为了降低虚拟零电压矢量开关频率,采用动态选择开关次数最小的虚拟零电压矢量生成方式,可实现在控制性能基本相当的前提下,有效减小开关频率。

1 共模电压

表贴式永磁同步电机 MPTC 系统中两电平三相逆变器的拓扑结构如图 1 所示。图 1 中: V_{dc} 为直流侧电压; o 为直流侧中点; n 为负载中性点,负载星型联结; g 为接地点; R 和 L 分别为负载电阻和电感。

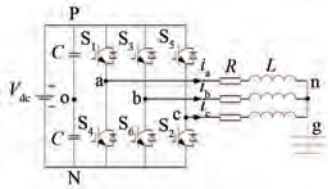


图 1 两电平三相逆变器拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of two-level three-phase inverter

共模电压 U_{com} 为负载中性点 n 和接地点 g 之间的电压差,如式(1)所示^[13]:

$$U_{com} = U_{ng} \approx U_{no} = \frac{U_{ao} + U_{bo} + U_{co}}{3} \quad (1)$$

式中: U_{no} 为负载中性点相对直流侧中点的电位差; U_{ao} 、 U_{bo} 和 U_{co} 为桥臂中点相对直流侧中点的电位差。

不同的逆变器开关状态对应不同的共模电压幅值,如表 1 所示。

表 1 不同开关状态对应的共模电压幅值

Tab. 1 Common-mode voltage amplitudes corresponding to different switching states

开关状态	共模电压幅值
$U_0(000)$	$-V_{dc}/2$
$U_1(100)$	$-V_{dc}/6$
$U_2(110)$	$V_{dc}/6$
$U_3(010)$	$-V_{dc}/6$
$U_4(011)$	$V_{dc}/6$
$U_5(001)$	$-V_{dc}/6$
$U_6(101)$	$V_{dc}/6$
$U_7(111)$	$V_{dc}/2$

2 永磁同步电机模型预测转矩控制

在定子坐标系下,表贴式永磁同步电机电磁转矩和磁链矢量的预测模型分别如式(2)和式(3)所示^[14]:

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

$$\begin{cases} \psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \frac{V_s \cdot T_s}{\psi_s(k)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; δ 为转矩角; ψ_s 为定子磁链矢量; ψ_r 为转子磁链; k 和 $k+1$ 为不同的采样时刻; α 为定子磁链矢量与电压矢量的夹角; L_d 为 d 轴电感; p 为电机极对数; V_s 为电压矢量幅值; T_s 为采样周期。

三相两电平逆变器有 7 个备选电压矢量,如式(4)所示,其中最小开关次数决定零电压矢量的选择^[15]。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (4)$$

定义成本函数如式(5)所示^[16]:

$$g = \sqrt{\left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*}{\psi_s^*}\right]^2 + \left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*}\right]^2} \quad (5)$$

式中: T_e^* 和 ψ_s^* 分别为转矩和磁链的参考值。

永磁同步电机 MPTC 系统框图如图 2 所示。基于 Matlab 建立基于定子坐标系的表贴式永磁同步电机 MPTC 仿真模型。仿真中,仿真模型为离散模型;采样时间为 5×10^{-5} s;直流母线电压为 312 V;初始参考转速为 60 r/min,1 s 时阶跃至 -60 r/min;负载转矩初始为 15 N·m,0.5 s 时阶跃至 -15 N·m,1.5 s 时阶跃至 15 N·m;仿真总时长为 2 s。仿真参数如表 2 所示,电机系统仿真波形如图 3~图 6 所示。

定义转矩脉动均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)、磁链脉动均方根误差、平均开关频率以及共模电压有效值如式(6)~式(9)所示:

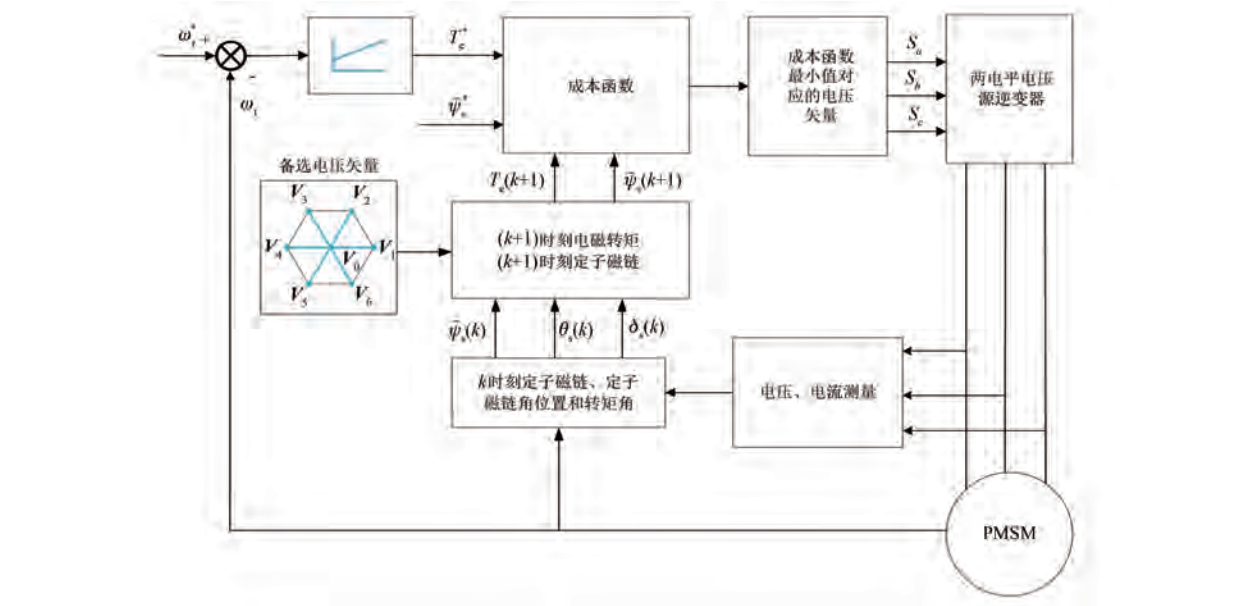


图 2 永磁同步电机 MPTC 系统框图

Fig. 2 Block diagram of MPTC system of PMSM

表 2 仿真系统参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
极对数 p	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
转速环 PI 调节器 K_p	50
转速环 PI 调节器 K_i	10
参考转矩上、下限 $(\text{N}\cdot\text{m})$	-30、30

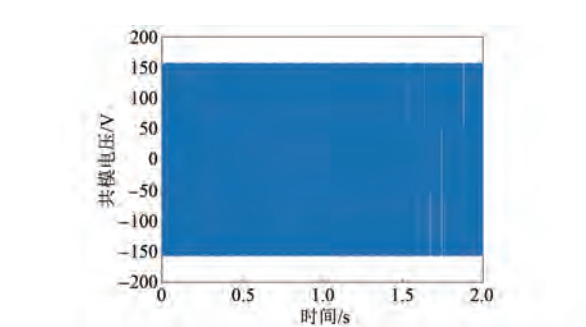


图 3 永磁同步电机共模电压

Fig. 3 Common-mode voltage of PMSM

$$T_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2} \tag{6}$$

$$\psi_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2} \tag{7}$$

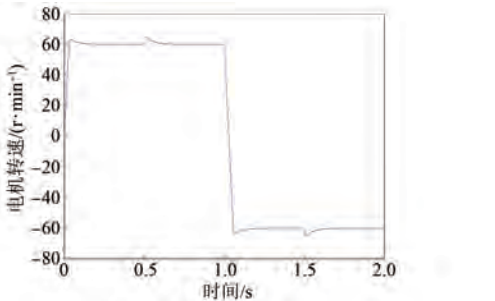


图 4 永磁同步电机转速

Fig. 4 Speed of PMSM

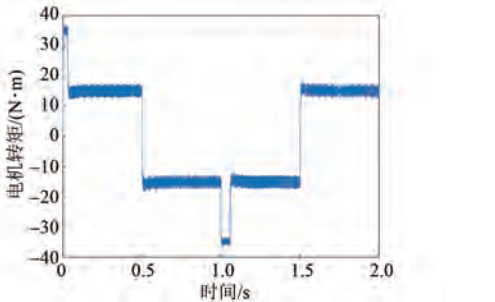


图 5 永磁同步电机转矩

Fig. 5 Torque of PMSM

$$f_{\text{ave}} = \frac{N_{\text{switching}}}{6t} \tag{8}$$

$$U_{\text{com_rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\text{com}}^2} \tag{9}$$

式中: n 为采样个数; t 为仿真时间; $N_{\text{switching}}$ 为逆变

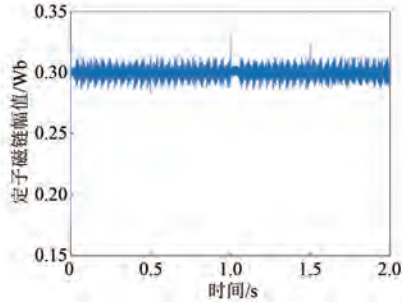


图6 永磁同步电机定子磁链

Fig. 6 Stator flux of PMSM

器桥臂开关总次数。

永磁同步电机 MPTC 系统性能如表 3 所示。

表3 永磁同步电机 MPTC 系统性能

Tab. 3 Performance of MPTC system of PMSM

参数名称	参数值
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.216 9
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.004 3
U_{com_rms}/V	108.710 8
f_{ave}/kHz	5.92

3 共模电压抑制方法对比

3.1 磁链、转矩和共模电压共同控制

利用 MPTC 灵活的特点,在永磁同步电机 MPTC 系统的成本函数中加入共模电压控制项,实现磁链、转矩和共模电压多目标共同控制,来抑制共模电压。加入共模电压控制项后,MPTC 的控制变量为转矩、磁链和共模电压,三者量纲不同,需要设计权重系数,但是权重系数的设计和调整目前尚无理论化解决方案。为消除权重系数,设计成本函数如式(10)所示^[17]:

$$\begin{cases} g = \sqrt{a + b + c} \\ a = \left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*} \right]^2 \\ b = \left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*}{\psi_s^*} \right]^2 \\ c = \left[\frac{U_{com}(k+1)}{U_{com}^{max}} \right]^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{com}^{max} 为共模电压幅值最大值。

由表 1 可知,共模电压幅值的取值只有 4 种可能,即 $\pm V_{dc}/2$ 或 $\pm V_{dc}/6$ 。因此,成本函数的共模电压控制项取值只有 2 种可能,即 1 或 1/9。不同开关状态对应的共模电压控制项如表 4 所示。

表4 不同开关状态对应的共模电压控制项

Tab. 4 Common-mode voltage control terms corresponding to different switching states

开关状态	共模电压控制项
000	1
100	1/9
110	1/9
010	1/9
011	1/9
001	1/9
101	1/9
111	1

保持仿真参数不变,采用磁链、转矩和共模电压共同控制方法的永磁同步电机 MPTC 系统仿真波形如图 7~图 10 所示,MPTC 系统性能如表 5 所示。

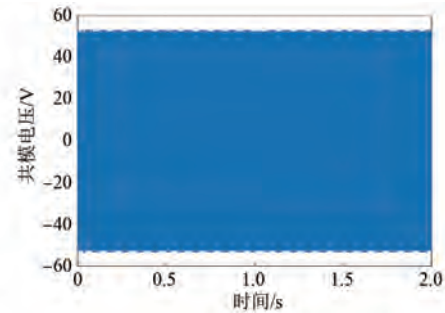


图7 采用共同控制方法的永磁同步电机共模电压

Fig. 7 Common-mode voltage of PMSM with joint control method

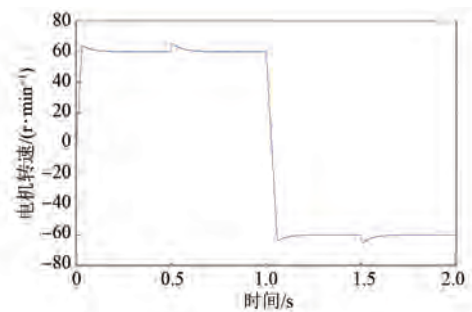


图8 采用共同控制方法的永磁同步电机转速

Fig. 8 Speed of PMSM with joint control method

仿真结果表明,与传统 MPTC 相比,在永磁同步电机 MPTC 的成本函数中加入共模电压控制项,共模电压峰值由 156 V 降低为 52 V,共模电压有效值降低为原来的 48.03%。由于系统实际上未使用零电压矢量,导致转矩脉动、磁链脉动和开关频率均有所增大,分别增大了 7.13%、18.60% 和

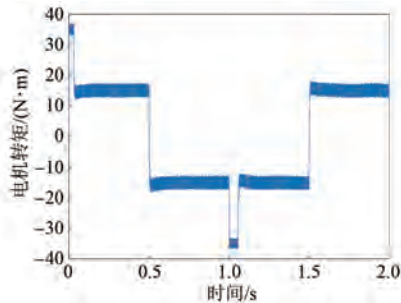


图 9 采用共同控制方法的永磁同步电机转矩

Fig. 9 Torque of PMSM with joint control method

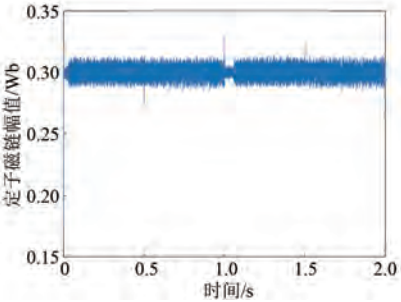


图 10 采用共同控制方法的永磁同步电机定子磁链

Fig. 10 Stator flux of PMSM with joint control method

35.47%。

表 5 采用共同控制方法的永磁同步电机 MPTC 系统性能

Tab. 5 Performance of MPTC system of PMSM with joint control method	
参数名称	参数值
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.303 7
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.005 1
U_{com_rms}/V	52.224 2
f_{ave}/kHz	8.02

3.2 直接去除零电压矢量

由表 1 可知,使用零电压矢量会产生较大的共模电压。因此,在永磁同步电机 MPTC 的备选电压矢量集合中直接去除零电压矢量,只使用 6 个非零基本电压矢量,如式 (11) 所示。此时,共模电压幅值最大值为 $V_{dc}/6$ 。

$$V_s \in \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \tag{11}$$

保持仿真参数不变,采用直接去除零电压矢量方法的永磁同步电机 MPTC 系统仿真波形如图 11~图 14 所示,MPTC 系统性能如表 6 所示。

仿真结果表明,与传统 MPTC 相比,采用直接去除零电压矢量方法,共模电压峰值由 156 V 降为 52 V,共模电压有效值降低为原来的 48.02%。

由于去除了零电压矢量,导致转矩脉动、磁链脉动以及开关频率均有所增大,分别增大了 7.95%、23.26% 和 5.64%。

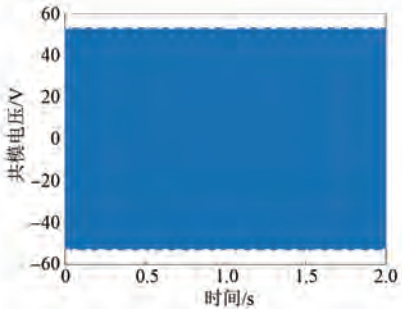


图 11 采用直接去除零电压矢量方法的永磁同步电机共模电压

Fig. 11 Common-mode voltage of PMSM with direct removal of zero voltage vector method

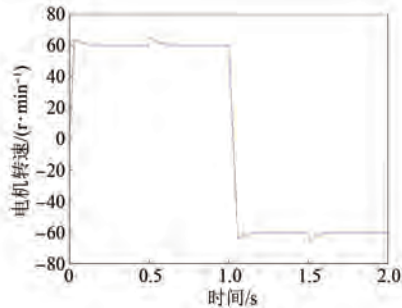


图 12 采用直接去除零电压矢量方法的永磁同步电机转速

Fig. 12 Speed of PMSM with direct removal of zero voltage vector method

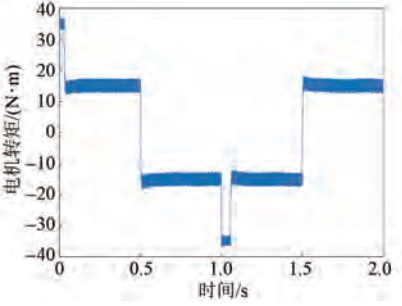


图 13 采用直接去除零电压矢量方法的永磁同步电机转矩

Fig. 13 Torque of PMSM with direct removal of zero voltage vector method

3.3 虚拟零电压矢量

在成本函数加入共模电压控制项的策略,由于共模电压控制项占比较大,系统实际上未使用零电压矢量,与在备选电压矢量集合中直接去除零电压矢量的方法相同。因此,两种方法对共模电压的抑制效果基本相同。但零电压矢量可减小

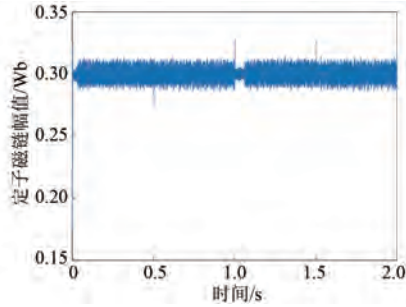


图 14 采用直接去除零电压矢量方法的永磁同步电机定子磁链

Fig. 14 Stator flux of PMSM with direct removal of zero voltage vector method

磁链和转矩,降低开关频率,在 MPTC 系统不能直接去除,否则会导致较大的磁链脉动和转矩脉动^[18-20]。因此,本文在一个控制周期内采用两个相位相反的非零基本电压矢量生成一个虚拟零电压矢量,从而达到既保留零电压矢量又抑制共模电压的效果。根据伏秒平衡方程可以得出相位相反的两个基本矢量的作用时间相等,即都为 $1/2$ 采样周期。因此共有六种组合方式,即 V_1-V_4 、 V_2-V_5 、 V_3-V_6 、 V_4-V_1 、 V_5-V_2 和 V_6-V_3 。

表 6 采用直接去除零电压矢量方法的永磁同步电机 MPTC 系统性能

Tab. 6 Performance of MPTC system of PMSM with direct removal of zero voltage vector method

参数名称	参数值
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.313 7
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.005 3
U_{com_rms}/V	52.204 2
f_{ave}/kHz	8.03

保持仿真参数不变,选择 V_1-V_4 组合方式生成虚拟零电压矢量,得到采用虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机 MPTC 系统仿真波形,如图 15~图 18 所示,MPTC 系统性能如表 7 所示。

表 7 采用虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机 MPTC 系统性能

Tab. 7 Performance of MPTC system with virtual zero voltage vector method

参数名称	参数值
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.247 6
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.004 8
U_{com_rms}/V	52.003 6
f_{ave}/kHz	15.65

仿真结果表明,与传统 MPTC 相比,采用虚拟

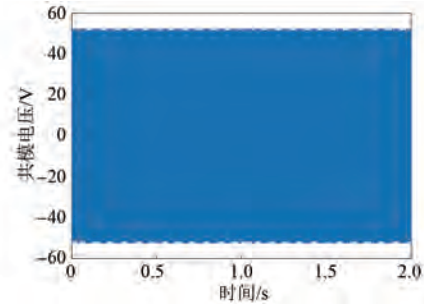


图 15 采用虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机共模电压

Fig. 15 Common-mode voltage of PMSM with virtual zero voltage vector method

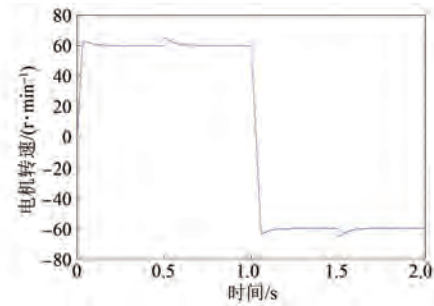


图 16 采用虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机转速

Fig. 16 Speed of PMSM with virtual zero voltage vector method

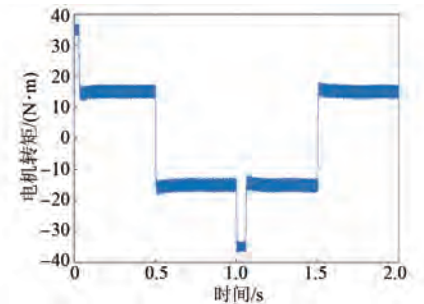


图 17 采用虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机转矩

Fig. 17 Torque of PMSM with virtual zero voltage vector method

零电压矢量方法,共模电压峰值由 156 V 降为 52 V,共模电压有效值降低为原来的 47.84%。转矩脉动和磁链脉动增大幅度较前两种共模电压抑制方法有所减小,分别增大了 2.52% 和 11.63%。由于一个控制周期需要作用两个电压矢量来生成虚拟零电压矢量,导致开关频率大幅增大,开关频率增大了 164.36%。

3.4 动态虚拟零电压矢量

为减小开关频率,基于开关次数最小原则,自适应动态选择 V_1-V_4 、 V_2-V_5 、 V_3-V_6 、 V_4-V_1 、 V_5-

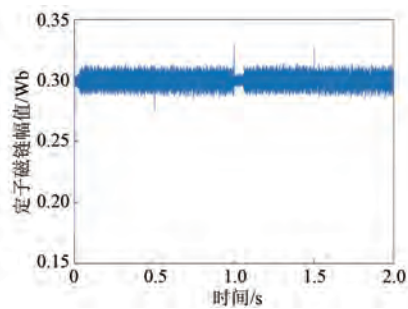


图 18 采用虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机定子磁链

Fig. 18 Stator flux of PMSM with virtual zero voltage vector method

V_2 和 V_6-V_3 这六种组合方式来生成虚拟零电压矢量,如表 8 所示。

表 8 自适应动态虚拟零电压矢量生成方式

Tab. 8 Adaptive dynamic generation method of virtual zero voltage vector

上一时刻电压矢量	零电压矢量生成方式
V_1	V_1-V_4
V_2	V_2-V_5
V_3	V_3-V_6
V_4	V_4-V_1
V_5	V_5-V_2
V_6	V_6-V_3

保持仿真参数不变,得到采用动态虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机 MPTC 系统仿真波形,如图 19~图 22 所示,MPTC 系统性能如表 9 所示。

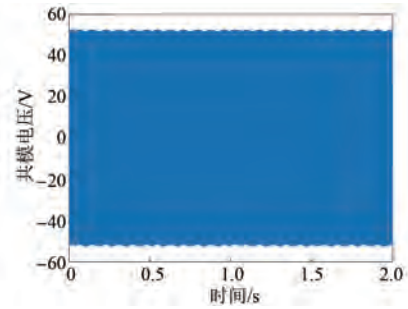


图 19 采用动态虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机共模电压

Fig. 19 Common-mode voltage of PMSM with dynamic virtual zero voltage vector method

仿真结果表明,相较于固定生成虚拟零电压矢量方法,采用自适应动态生成虚拟零电压矢量方法,开关频率降低了 29.46%。由于自适应动态生成虚拟零电压矢量增大了非零电压矢量的作用时间,转矩脉动和磁链脉动轻微增大,分别增大

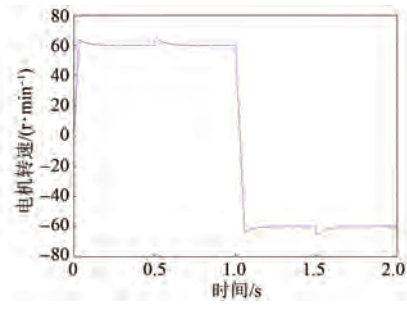


图 20 采用动态虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机转速

Fig. 20 Speed of PMSM with dynamic virtual zero voltage vector method

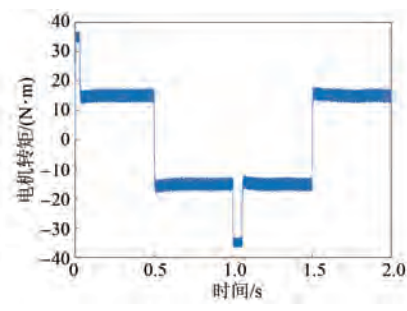


图 21 采用动态虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机转矩

Fig. 21 Torque of PMSM with dynamic virtual zero voltage vector method

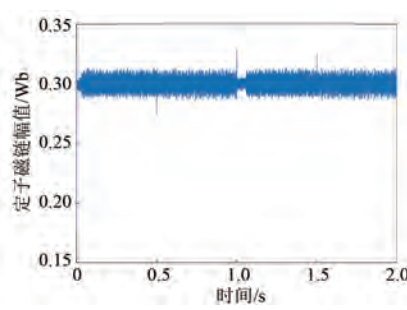


图 22 采用动态虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机定子磁链

Fig. 22 Stator flux of PMSM with dynamic virtual zero voltage vector method

0.58% 和 2%。

综上,将传统MPTC系统性能与采用磁链、转矩 表 9 采用动态虚拟零电压矢量方法的永磁同步电机 MPTC 系统性能

Tab. 9 Performances of MPTC system with dynamic virtual zero voltage vector method

参数名称	参数值
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.254 8
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.004 9
U_{com_rms}/V	52.003 6
f_{ave}/kHz	11.04

矩和共模电压共同控制方法、直接去除零电压矢量方法、虚拟零电压矢量方法及动态虚拟零电压矢量方法的 MPTC 系统性能进行对比,结果如表 10 所示。

由表 10 可知,4 种共模电压抑制方法的抑制效果基本一致。磁链、转矩和共模电压共同控制与直接去除零电压矢量都没有使用零电压矢量,导致转矩脉动、磁链脉动以及开关频率增大;虚拟零电压矢量在保留零电压矢量的前提下实现共模电压抑制,减小了磁链脉动和转矩脉动,但在一个采样周期施加了两个电压矢量,导致开关频率极大增大;动态虚拟零电压矢量选择开关次数最小的零电压矢量生成方式,相较于虚拟零电压矢量方法可有效减小开关频率,但增大了非零电压的作用时间,导致转矩脉动和磁链脉动轻微增大。

表 10 不同控制策略下的 MPTC 系统性能

Tab. 10 Performance of MPTC system with different control strategies

控制策略	$T_{rip_RMSE}/$ (N·m)	$\psi_{rip_RMSE}/$ Wb	$U_{com_rms}/$ V	$f_{ave}/$ kHz
传统 MPTC	1.216 9	0.004 3	108.710 8	5.92
共同控制	1.303 7	0.005 1	52.224 2	8.02
直接去除零电压矢量	1.313 7	0.005 3	52.204 2	8.03
虚拟零电压矢量	1.247 6	0.004 8	52.003 6	15.65
动态虚拟零电压矢量	1.254 8	0.004 9	52.003 6	11.04

4 结语

(1) 磁链、转矩和共模电压共同控制、直接去除零电压矢量和虚拟零电压矢量三种共模电压抑制方法对共模电压的抑制效果基本一致,均将共模电压峰值从 $V_{dc}/2$ 减小至 $V_{dc}/6$,将共模电压有效值抑制为原来的 48% 左右。

(2) 磁链、转矩和共模电压共同控制方法和直接去除零电压矢量方法均未使用零电压矢量,导致磁链脉动和转矩脉动增大;虚拟零电压矢量方法可在保留零电压矢量的前提下有效抑制共模电压,但由于一个采样周期施加了两个电压矢量,导致开关频率增大。

(3) 动态虚拟零电压矢量方法选择开关次数最小的零电压矢量生成方式,相较于虚拟零电压矢量方法有效减小了开关频率,但由于非零电压的作用时间增大,转矩脉动和磁链脉动轻微增大。

参考文献

- [1] 王治国, 郑泽东, 李永东, 等. 交流电机模型预测控制综述[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 14-30.
WANG Z G, ZHENG Z D, LI Y D, et al. A review of model predictive control for AC motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 14-30.
- [2] RODRIGUEZ J, GARICA C, MORA A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives-part I: Basic concepts and advanced strategies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3927-3942.
- [3] CHEN X, XU W, LIU Y, et al. Bearing corrosion failure diagnosis of doubly fed induction generator in wind turbines based on stator current analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3419-3430.
- [4] JIANG D, CHEN J N, SHEN Z W. Common mode EMI reduction through PWM methods for three-phase motor controller [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(2): 133-142.
- [5] XU Y P, LIANG Y, YUAN X B, et al. Experimental assessment of high frequency bearing currents in an induction motor driven by a SiC inverter [J]. IEEE Access, 2021, 9: 40540-40549.
- [6] VARGAS R, AMMANN U, RODRIGUEZ J, et al. Predictive strategy to control common-mode voltage in loads fed by matrix converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4372-4380.
- [7] VARGAS R, AMMANN U, RODRIGUEZ J, et al. Predictive control of an induction machine fed by a matrix converter with increased efficiency and reduced common-mode voltage [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 473-485.
- [8] ROJAS C A, AGUIRRE M, KOURO S, et al. Leakage current mitigation in photovoltaic string inverter using predictive control with fixed average switching frequency [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9344-9354.
- [9] BHOWATE A, AWARE M, SHARMA S, et al. Predictive torque control with online weighting factor computation technique to improve performance of induction motor drive in low speed region [J]. IEEE

- Access, 2019, 7: 42309-42321.
- [10] 徐质闲, 王政, 王学庆, 等. T 型三电平双三相永磁同步电机驱动零共模电压模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4301-4310.
- XU Z X, WANG Z, WANG X Q, et al. A predictive current control method for a T-type three-level dual three-phase PMSM with zero common-mode voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4301-4310.
- [11] YU B, SONG W S, GUO Y Q, et al. Virtual voltage vector-based model predictive current control for five-phase VSIs with common-mode voltage reduction [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(2): 706-717.
- [12] 杨宇. 两电平逆变器共模电压抑制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- YANG Y. Study on the common-mode voltage suppressing strategy of two-level inverter [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [13] 陈致君, 王涛, 刘闯, 等. 具有共模电压抑制能力的 PMSM 混合模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 8-16.
- CHEN Z J, WANG T, LIU C, et al. Hybrid model predictive torque control for PMSM with common-mode voltage suppression capability [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9): 8-16.
- [14] 李耀华, 陈桂鑫, 王孝宇. 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[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 16-21.
- LI Y H, CHEN G X, WANG X Y. Research on predictive model of the SPMSM MPTC system [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(1): 16-21.
- [15] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞, 等. 自适应电压矢量 PMSM 直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 75-83.
- LI Y H, YANG Q D, QU Y F, et al. Adaptive variable voltage vectors switching table in direct torque control for PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 75-83.
- [16] 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): 33-43.
- LI Y H, LIU Y, MENG X Z. Finite control set model predictive direct torque control of surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 49(12): 33-43.
- [17] 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控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 7-12.
- LI Y H, ZHANG X Q, CUI K J, et al. Model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor with pre-unit unweighting factor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 7-12.
- [18] 赵宏革, 朱景伟, 樊印海. 直接转矩控制系统零电压矢量的调节作用[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(2): 71-74.
- ZHAO H G, ZHU J W, FAN Y H. Regulating effect of zero voltage vectors in a direct torque control system [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, 36(2): 71-74.
- [19] 李耀华, 刘卫国. 零电压矢量在 PMSM 直接转矩控制系统中的应用[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 50-51+62.
- LI Y H, LIU W G. Study of the use of zero voltage vectors in the PMSM DTC system [J]. Power Electronics, 2010, 44(9): 50-51+62.
- [20] 李耀华, 曲亚飞, 刘子焜, 等. 基于转矩误差带的表贴式永磁同步电机 MPTC 系统精简策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 25-31.
- LI Y H, QU Y F, LIU Z K, et al. Simplified control strategy for SPMSM MPTC system based on band of torque error [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(12): 25-31.

收稿日期:2024-03-12

收到修改稿日期:2024-04-03

作者简介:

李耀华(1980-),男,博士,副教授,研究方向为新能源汽车电机电控,nuaaliyaohua@126.com;

* 通信作者:李耀华(1980-),男,博士,副教授,研究方向为新能源汽车电机电控,nuaaliyaohua@126.com。

Research on Suppression Strategy of Common-Mode Voltage of MPTC for PMSM

LI Yaohua^{*}, DENG Yizhi, ZHANG Xinquan, TONG Ruiqi

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

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive torque control; common-mode voltage; virtual zero voltage vector

Model predictive control (MPC) has become a research hotspot in the field of permanent magnet synchronous motor (PMSM) control due to its superior control performance, simple structure and strong anti-interference ability. MPC system generates large common-mode voltage, which damages the winding insulation and motor bearings and reduce the service life of the motor. The common-mode voltage generates high-frequency oscillating common-mode current, which brings electromagnetic interference problems and affects the normal operation of electronic equipment. Adding a common-mode voltage control term to the cost function of MPC can achieve the effect of suppressing the common-mode voltage, but this brings the problem of designing and adjusting the weighting coefficients. Using a collection of alternative voltage vectors without zero voltage vector also suppresses the common-mode voltage, but the control performance of the system is degraded compared to the traditional MPC. Using the non-zero basic voltage vectors to synthesize virtual zero voltage vector can effectively reduce the torque ripple and current ripple caused by discarding zero voltage vector.

A model predictive torque control model for surface-mounted PMSM is established. Based on this model, the effectiveness of three methods, namely, flux linkage, torque and common-mode voltage joint control, direct removal of zero voltage vector and virtual zero voltage vector, on the suppression of common-mode voltage is compared. And the

switching frequency is reduced by adaptive dynamic generation of virtual zero voltage vector. Finally, the following conclusions are obtained through simulation.

1. The three common-mode voltage suppression methods of flux linkage, torque and common-mode voltage joint control, direct removal of zero voltage vector and virtual zero voltage vector have basically the same effect on the common-mode voltage suppression, and all of them reduce the peak common-mode voltage from $V_{dc}/2$ to $V_{dc}/6$, which suppress the root mean square of common-mode voltage to about 48% of the original value.

2. Both the flux linkage, torque and common-mode voltage joint control method and the direct removal of zero voltage vector method do not use the zero voltage vector, which lead to an increase in the flux linkage ripple and torque ripple. The virtual zero voltage vector method can effectively suppress the common-mode voltage while retaining the zero voltage vector, but it leads to an increase in the switching frequency due to the fact that two voltage vectors are applied in one sampling period.

3. The adaptive dynamic virtual zero-voltage vector method selects the zero voltage vector generation method with the smallest number of switching times, which effectively reduces the switching frequency compared to the virtual zero voltage vector method, but the torque ripple and flux linkage ripple increase slightly due to the increase in the action time of the non-zero voltage, and the overall comprehensive performance is optimal.