

# 基于输入电流连续型开关升压变换器的永磁同步电机预测电流控制方法的研究<sup>\*</sup>

刘 硕, 韩 硕, 杨立永

(北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144)

**摘 要:** 针对传统永磁同步电机(PMSM)驱动系统存在的问题,应用一种连续型开关升压逆变器,通过应用预测控制方法提高 PMSM 控制性能。拓扑电路在逆变电路和输入直流电源之间加入一个开关升压电路,以达到提高系统电压增益和消除死区的目的,同时可使系统具有更高的可靠性。此外,采用预测电流控制(PCC)方法对 PMSM 进行控制,与传统的矢量控制技术相比,PCC 具有更快的动态响应,并减少了电流脉动。最终,通过试验验证了基于开关升压变换器的 PMSM PCC 的可行性。

**关键词:** 永磁同步电机;连续型开关升压变换器;预测电流控制;代价函数

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)04-0022-05

## Research on Predictive Current Control Method for PMSM Based on Input Current Continuous Switched Boost Inverter<sup>\*</sup>

LIU Shuo, HAN Shuo, YANG Liyong

(College of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** A type of continuous switched boost inverter was used to improve the control performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) through predictive control, aiming at the drawback of the traditional PMSM drive system. By adding a switched boost circuit between the inverted circuit and input DC power, switched boost inverter circuit was formed to achieve higher voltage gain and eliminate the dead zone. Meanwhile, the drive system had higher reliability. Moreover, predictive current control (PCC) was adopted to control PMSM. In comparison with the traditional field oriented control, PCC had faster dynamic response and could reduce current ripple. Finally, experiment results verified the feasibility of the predictive current control for PMSM based on the continuous switched boost inverter.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); continuous switched boost inverter; predictive current control; cost function

## 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有较高的效率,同时拥有发热少、体积小、结构简单、可靠性好等优点,在工农业生产、工业自动化领域应用广泛<sup>[1]</sup>。PMSM 驱动器采用传统三相桥式逆变电路<sup>[2]</sup>能够

明显减小电机电流的谐波并降低转矩脉动,但传统桥式电路为 Buck 电路,需要在同一桥臂加入死区以防止系统短路。文献[3-6]提出 Z 源逆变器(ZSI),虽 ZSI 具有较高的电压增益,并允许在逆变器的任一桥臂直通,从而提高系统的可靠性,但其需要较多的无源元件。本文针对 ZSI 的缺点,

<sup>\*</sup> 基金项目:北京市自然科学基金项目(3174048)

作者简介:刘 硕(1985—),男,博士,研究方向为电力电子与电力传动。

韩 硕(1993—),女,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

杨立永(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动。

应用一种连续型开关升压逆变器(CSBI)<sup>[7-8]</sup>, 拓扑电路兼顾了 ZSI 的所有优点, 并使用了较少的无源元件; 同时, 系统具有很好的抗电磁干扰(EMI)能力<sup>[7]</sup>和较强的鲁棒性<sup>[9]</sup>。将 CSBI 应用于 PMSM 矢量控制系统, 并引入预测电流控制(PCC)<sup>[10-11]</sup>, 提高了电机的响应速度。最终通过试验验证了系统的可行性。

## 1 CSBI 数学模型分析

### 1.1 CSBI 电路

CSBI 拓扑电路如图 1 所示。开关升压电路由 1 个电感、1 个电容、1 个功率开关和 2 个二极管组成。

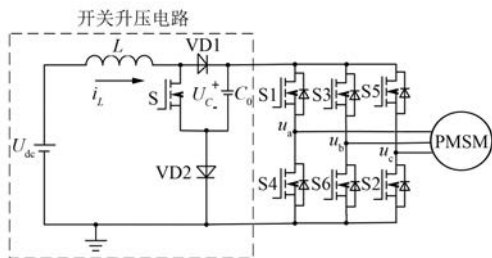


图 1 CSBI 拓扑电路

### 1.2 CSBI 拓扑电路分析

CSBI 具有较高的电压增益, 其可工作在两种工作状态: 直通状态和非直通状态。直通状态下, 开关 S 和  $S_i (i=1 \sim 6)$  导通, 二极管 VD1 和 VD2 截止, 三相逆变器任一桥臂直通, 如图 2(a) 所示。电感器 L 由电容  $C_0$  和输入电源  $U_{dc}$  充电, 此时工作时间为  $T_1$ 。非直通状态下, 开关 S 断开,  $S_i (i=1 \sim 6)$  正常工作, 二极管 VD1 和 VD2 导通, 电容  $C_0$  由电感 L 充电, 如图 2(b) 所示。此时工作时间为  $1-T_1$ 。

当逆变器工作在直通状态时, 电感 L 的电压和电容  $C_0$  的电流的状态方程由图 2(a) 可得:

$$\begin{cases} U_L = U_{dc} + U_C \\ i_C = -i_L \end{cases} \quad (1)$$

当逆变器工作在非直通状态时, 电感 L 的电压和电容  $C_0$  的电流的状态方程由图 2(b) 可得:

$$\begin{cases} U_L = U_{dc} - U_C \\ i_C = i_L - i_i \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_L$ ——电感 L 的电压;

$U_{dc}$ ——输入电压源;

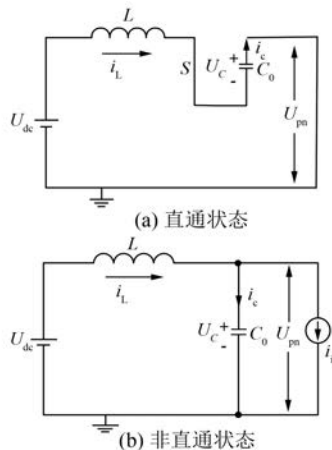


图 2 连续型开关升压逆变等效电路

$U_C$ ——电容  $C_0$  的电压;

$i_L$ ——电感 L 的电流;

$i_C$ ——电容  $C_0$  的电流;

$i_i$ ——逆变器的输出电流。

稳态平衡时, 根据电感伏秒平衡原理和电容电荷平衡原理, 能够得到 CSBI 的电压增益  $B$  为<sup>[5-6]</sup>:

$$B = \frac{U_C}{U_{dc}} = \frac{1}{1-2D} \quad (3)$$

式中:  $D$ ——直通占空比,  $D = T_1 / (T)$ ,  $T$  为开关周期。

电压增益与直通占空比的关系如图 3 所示。

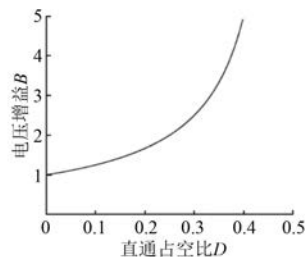


图 3 电压增益和直通占空比的关系曲线

从图 3 可以看出, 系统的电压增益随着直通占空比的增大而增大。

## 2 PMSM 预测控制

### 2.1 PMSM 离散数学模型

PCC<sup>[11-12]</sup> 需要将传统 PMSM 数学模型离散化。通过当前的  $d-q$  轴电流值、电角度大小和  $d-q$  轴输入电压值, 预测下一状态的  $d-q$  轴电流值。

当采样频率足够高时,建立表贴式 PMSM ( $L_d = L_q = L_{dq}$ ) 的离散数学模型<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} i_{d(k+1)} = \left(1 - \frac{RT_s}{L_d} i_{dk} + \omega_{sk} T_s i_{qk}\right) + \frac{T_s}{L_d} u_{dk} \\ i_{q(k+1)} = \left(1 - \frac{RT_s}{L_d}\right) i_{dk} - \omega_{sk} \left(T_s i_{qk} + \frac{T_s \psi_f}{L_q}\right) + \frac{T_s}{L_q} u_{qk} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $i_{d(k+1)}$  和  $i_{q(k+1)}$  ——  $k+1$  时刻电机的  $d$ 、 $q$  轴电流;

$R$ ——定子电阻;

$T_s$ ——采样周期;

$L_d$ 、 $L_q$ ——电机的  $d$ 、 $q$  轴电感;

$i_{dk}$ 、 $i_{qk}$ —— $k$  时刻电机的  $d$ 、 $q$  轴电流;

$\omega_{sk}$ ——电角频率;

$u_{dk}$ 、 $u_{qk}$ ——电机  $d$ 、 $q$  轴电压;

$\psi_f$ ——永磁体的磁链。

## 2.2 预测电流控制

为了实现 PCC 技术需要建立代价函数<sup>[14-15]</sup>。代价函数包含多个控制目标、变量、非线性条件和其他系统约束。然后,对预测控制模型中的代价函数进行分析和优化。

预测电流控制器的设计需要参考电压的计算,以确保电流在下一步中能够跟随参考电压。目标是获得预测电流  $i_{d(k+1)}$ 、 $i_{q(k+1)}$  和参考值  $i_{dk}^*$ 、 $i_{qk}^*$  差的最小值。本文采用  $i_{dk}^* = 0$  控制方法<sup>[2]</sup>。代价函数用来选择预测电流和给定电流误差最小的电压矢量,预测电流值可由 PMSM 的离散模型式(4)给出,代价函数<sup>[8,13,16]</sup>如下:

$$g(u_{dk}^*, u_{qk}^*) = i_{d(k+1)}^2 + [i_{q(k+1)} - i_{qk}^*]^2 \quad (5)$$

图4所示为PI控制器用于速度控制回路的PCC算法框图。PCC优化了电压矢量和占空比,同时通过加入代价函数,可以保证所选电压矢量最优,明显改善了系统的稳态性能。代价函数包

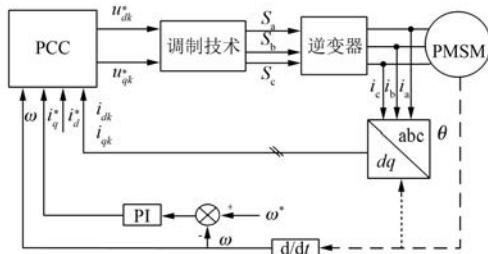


图4 PCC算法控制框图

括  $u_{dk}^*$  和  $u_{qk}^*$ , 同时, 必须保证每一步达到最小值。由式(4)可知, 预测电流  $i_{d(k+1)}$ 、 $i_{q(k+1)}$  可以分别使用参考电压、测量的电流值和转子转速表示。因此, 代价函数可以改写为

$$g(\mathbf{u}_k) = \mathbf{u}_k^T \lambda^2 \mathbf{u}_k + \boldsymbol{\mu}_k \mathbf{u}_k \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} u_{dk} \\ u_{qk} \end{bmatrix}$ ;  $\lambda = \frac{T_s}{L_{dq}}$ ;  $\boldsymbol{\mu}_k = \left\{ 2\lambda \left[ i_{dk} - \frac{RT_s}{L_{dq}} i_{dk} + \omega_{sk} T_s i_{q(k+1)} \right] 2\lambda \left( -\omega_{sk} T_s i_{dk} + i_{qk} + \frac{RT_s}{L_{dq}} i_{qk} - i_{qk} - \omega_{sk} \frac{T_s}{L_{dq}} \psi_f \right) \right\}$ ;  $L_{dq}$  为电机相电感。

由于需要满足电机安全性和可靠性的要求, 系统需要增加限制条件, 即电流幅值不能超过规定的最大值。根据电机的技术指标选择最大电流作为最大瞬时允许电流。

最大瞬时允许电流 ( $i_{\text{MAX}}$ ) 需要一定的限制<sup>[11]</sup>, 如式(7)所示:

$$\begin{cases} i_{d(k+1)} < i_{\text{MAX}} \\ i_{q(k+1)} < i_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (7)$$

将式(4)代入式(7), 控制器获得最优控制电压值应按式(8)约束:

$$\begin{cases} u_{dk}^* < \frac{1}{\lambda} \left( i_{\text{MAX}} - i_{dk} + \frac{RT_s}{L_{dq}} i_{dk} - \omega_{sk} T_s i_{qk} \right) \\ u_{qk}^* < \frac{1}{\lambda} \left( i_{\text{MAX}} + \omega_{sk} T_s i_{dk} - i_{qk} + \frac{RT_s}{L_{dq}} i_{qk} \right) + \omega_{sk} \psi_f \end{cases} \quad (8)$$

运用牛顿迭代优化算法, 可以使系统运行在完成优化过程的情况下, 通过以下公式导出  $r+1$  阶迭代结果作为第  $r$  次迭代结果的函数<sup>[11]</sup>, 即:

$$\mathbf{u}_{k(r+1)} = \mathbf{u}_{kr} - \gamma \left( \mathbf{u}_{kr} + \frac{1}{2\lambda} \boldsymbol{\mu}_k^T \right) \quad (9)$$

引入牛顿迭代法的系数  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) 进行修正, 可以使控制器在减少步长时, 防止潜在的数值不稳定、发散和超调。

## 3 基于连续型开关升压逆变器的 PMSM PCC 试验验证

为了验证本文所提基于 CSBI 的 PCC 策略的可行性, 进行了试验。试验由 PMSM 及一个由 STM32f407ZGT6 和 EMP570T100C5 组成的控制

板实现。系统的控制参数如表 1 和表 2 所示。

| 表 1 PMSM 参数                         |          |
|-------------------------------------|----------|
| 参数名称                                | 参数值      |
| 额定电压 $U_n/V$                        | 160      |
| 额定电流 $I_n/A$                        | 5.5      |
| 额定转速 $\omega_n/(r \cdot \min^{-1})$ | 1 200    |
| 相电感 $L_{dq}/mH$                     | 17       |
| 相电阻 $R/\Omega$                      | 1.3      |
| 转矩常数 $k_m/(N \cdot m \cdot A^{-1})$ | 1.23     |
| 极对数 $p$                             | 3        |
| 转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$             | 0.000 87 |

| 表 2 控制系统参数          |      |
|---------------------|------|
| 参数名称                | 参数值  |
| 输入电压 $U_{dc}/V$     | 36   |
| 开关频率 $f_s/kHz$      | 5    |
| 采样周期 $T_s/ms$       | 0.2  |
| 升压电路电感 $L/mH$       | 2    |
| 直流母线电容器 $C_0/\mu F$ | 560  |
| 速度环比例环节 $K_{Ps}$    | 5    |
| 速度环积分环节 $K_{Is}$    | 0.35 |
| 电流环比例环节 $K_{Pi}$    | 0.05 |
| 电流环积分环节 $K_{Ii}$    | 0.5  |
| 直通占空比 $D$           | 0.3  |
| 最优步长系数 $\gamma$     | 0.7  |

3.1 CSBI 的输入电压和母线电压试验结果

图 5 中,输入电压  $U_{dc}$  为 36.8 V, 稳态后,母线电压  $U_c$  为 93.5 V。根据式(3)可得升压后母线电压  $U_c$  为 92 V。理论与试验结果相符。

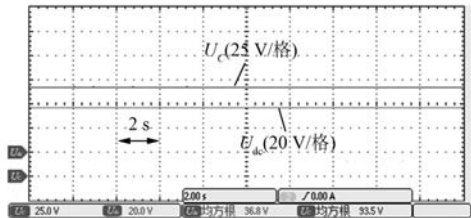


图 5 输入电压与母线电压试验波形图

3.2 控制系统性能分析

稳态情况下的定子 a 相电流波形如图 6 所示。可以看出,在 PCC 方法下得到的电流波形没有明显的畸变和电流振荡。

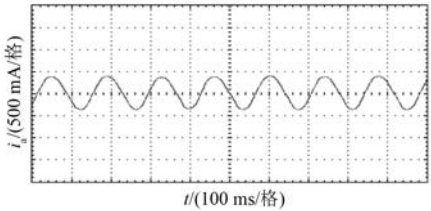


图 6 定子 a 相电流波形

图 7 所示为转速试验波形图,以恒定转速 70 r/min 稳定运行,4 s 后,电机转速升至 150 r/min。

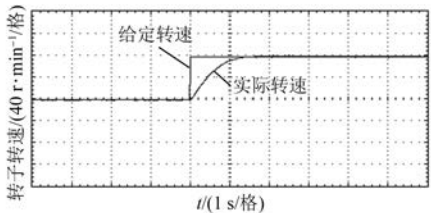


图 7 转速试验波形图

由图 7 可知,PCC 算法的上升时间为 1.4 s,没有速度超调和稳态误差。

4 结 语

本文设计了一种基于 CSBI 的 PMSM 预测控制技术。该拓扑电路具有更高的电压增益,同时,该拓扑允许逆变器直通且具有更好的 EMI 抗干扰性。将该拓扑应用于 PMSM,同时应用 PCC 算法,提高系统的波形质量和响应速度,减小了电流脉动。通过试验也验证了基于 CSBI 的 PMSM PCC 系统得到了较强的鲁棒性和优越的动态性能。

【参考文献】

[ 1 ] 郭淑英.永磁同步传动系统现状及应用[J].机车电传动,2014(3): 1.

[ 2 ] SINGH S, TIWARI A N. Analysis and simulation of vector controlled PMSM drive using SVPWM inverter [C] // International Conference for Convergence in Technology, 2017.

[ 3 ] XIAO S, XIA C, WANG Z, et al. A novel SVPWM based maximum boost control of Z source inverter in motor drive application [C] // IEEE International, Electric Machines and Drives Conference, 2017.

- [4] 王树文,单硕硕,张洋,等.改进型准 Z 源逆变器[J].电力自动化设备,2016,36(9): 142.
- [5] 徐聪,程启明,李明,等.Z 源逆变器及其多种改进拓扑结构的比较[J].电网技术,2014, 38(10): 2926.
- [6] MAWLIKAR M A, NAIR S S. A comparative analysis of Z source inverter and DC-DC converter fed VSI [C] // IEEE International Conference on Nascent Technologies in Engineering, 2017.
- [7] NAG S S, MISHRA S. Current-fed switched inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4680.
- [8] RAVINDRANATH A, MISHRA S K, JOSHI A. Analysis and PWM control of switched boost inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5593.
- [9] 徐艳平,王极兵,张保程,等.永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J].中国电机工程学报,2018, 38(6): 980.
- [10] 陈若珠,何婷,常勇.永磁同步电机模型预测控制的现状与发展[J].工业仪表与自动化装置,2017 (3): 20.
- [11] 徐艳平,张保程,周钦.永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J].电工技术学报,2017, 32(20): 222.
- [12] ALEXANDROU A D, ADAMOPOULOS N K, KLADAS A G. Development of a constant switching frequency deadbeat predictive control technique for field-oriented synchronous permanent-magnet motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5167.
- [13] 史婷娜,张维,肖萌,等.基于矢量作用时间的永磁同步电机预测电流控制[J].电工技术学报,2017, 32(19): 1.
- [14] 汪琦,王爽,付俊永,等.基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J].电机与控制应用,2017,44(7): 48.
- [15] SIAMI M, KHABURI D A, RIVERA M, et al. An experimental evaluation of predictive current control and predictive torque control for a PMSM fed by a matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8459.
- [16] SIAMI M, KHABURI D A, ABBASZADEH A, et al. Robustness improvement of predictive current control using prediction error correction for permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3458.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 14 页)

- [14] LIM C S, RAHIM N A, HEW W P, et al. Model predictive control of a two-motor drive with five-leg inverter supply [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 54.
- [15] OKA K, NOZAWA Y, MATSUSE K. An improved method of voltage utility factor for PWM control of a five-leg inverter in two induction motor drives [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2006, 1(1): 108.
- [16] IBRAHIM Z, LAZI J M, SULAIMAN M. Independent speed sensorless control of dual parallel PMSM based on five-leg inverter [C] // International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Chemnitz, 2012.
- [17] OMATA R, OKA K, FURUYA A, et al. An improved performance of five-leg inverter two induction motor drives [C] // 2016 CE8/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006.
- [18] HARA A, ENOKIJIMA H, TANAKA T, et al. Independent speed control of two induction motors fed by a five-leg inverter applying space vector modulation [C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011.
- [19] 谷鑫,姜勃,耿强,等.双永磁同步电机五桥臂变换器模型预测控制[J].电工电能新技术,2015, 34(12): 25.

收稿日期: 2018-10-11