

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181432

# 基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速系统控制策略

刘 继, 张小平, 张瑞瑞

(湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 针对以 Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC)为功率变换器的异步电机调速系统, 提出一种基于有限时间控制的变频调速控制方法。首先, 根据异步电机的给定转速, 经基于 PI-IP 控制的矢量控制算法获得异步电机的给定电压, 并以该给定电压作为 BBMC 的参考输出电压。再以 BBMC 中电容电压与电感电流作为系统控制变量, 经有限时间控制算法得到 BBMC 中对应功率开关的占空比。再根据该占空比对 BBMC 中对应功率开关实施控制, 由此可在 BBMC 输出端获得与其参考输出一致的输出电压, 从而实现异步电机实际转速对其给定转速的准确跟踪, 达到对异步电机转速进行准确控制的目的。最后通过仿真和实验对上述控制方法进行了验证。

**关键词:** Buck-Boost 矩阵变换器; 异步电机调速系统; PI-IP 控制; 有限时间控制

## Control strategy of induction motor speed control system based on Buck-Boost matrix converter

LIU Ji, ZHANG Xiaoping, ZHANG Ruirui

(National Union Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration and Production Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aiming at the asynchronous motor speed control system with Buck-Boost Matrix Converter (BBMC) as power converter, a frequency conversion speed control method based on finite time control is proposed. Firstly, according to the given speed of the asynchronous motor, the given voltage of the asynchronous motor is obtained by the vector control algorithm based on PI-IP, and the given voltage is used as the reference output voltage of the BBMC. Then the capacitive voltage and inductance current in BBMC are taken as the system control variables, and the duty cycle of the corresponding power switch in BBMC is obtained by the finite time control algorithm, and then the corresponding power in BBMC is opened according to the duty cycle. The output voltage which is consistent with its reference output can be obtained at the output end of BBMC, so that the accurate tracking of the actual speed of asynchronous motor to its given speed can be realized, and the purpose of accurate control of the speed of asynchronous motor can be achieved. Finally, the control method is verified by simulation and experiment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477047).

**Key words:** Buck-Boost matrix converter; asynchronous motor speed control system; PI-IP control; finite time control

## 0 引言

Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC)是一种具有简单拓扑结构和一系列理想电气特性的新型电力变换器<sup>[1]</sup>, 适合作为功率变换器应用于异步电机调速系统中; 而对其研究有效的调速控制策略, 则是实现其高性能调速控制的基本前提。

目前在针对 BBMC 的控制方面已开展了系列研究工作, 提出了多种控制方法。其中, 文献[1-5]

分别提出采用滑模控制策略, 实现了对系统的稳定控制, 且对系统模型误差和参数变化具有较好的鲁棒性, 但存在开关频率不固定等不足。为此, 文献[6-9]提出采用离散滑模控制策略, 该控制策略解决了滑模控制开关频率不固定的问题, 同时其稳态性能也较滑模控制有了明显改善; 但在参考输出电压或负载发生突变时, 输出超调的现象仍较严重。因此, 文献[10-11]针对 BBMC 提出采用双闭环控制策略, 该控制策略通过两个闭环控制实现了对 BBMC 中两个状态变量的解耦控制, 不仅控制方案简单, 而且因其实现了对电感电流的直接控制而使其对外

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477047)

部干扰具有很强的鲁棒性, 即使在非线性负载、负载突变等恶劣情况下也能保证系统的稳定运行, 因而具有很高的可靠性。此外, 文献[12-13]还提出采用自抗扰控制策略, 也取得了较好的控制效果。然而上述控制策略均存在一定的稳态误差, 即 BBMC 的实际输出电压与其参考输出电压间存在一定的稳态跟踪误差, 为此文献[14-16]提出采用一种基于重复控制和 PI 控制结合的复合控制策略, 取得了较好的效果, 实现了 BBMC 实际输出电压对其参考电压的准确跟踪。

然而上述针对 BBMC 所研究采用的各种控制方法, 均属于解决无限时间稳定性的控制问题; 对于一个控制系统来说, 当其状态发生突变或受到外部扰动时, 如何在有限时间内使其恢复稳定仍是体现其动态稳定性的一个重要性能指标。为此, 文中基于有限时间控制的基本原理<sup>[17-19]</sup>, 结合基于 BBMC 的异步电机调速系统的控制要求, 针对该调速系统提出一种基于有限时间控制的控制方法。文中阐述了该控制方法的基本原理与具体实现过程, 并通过仿真和实验对其控制效果进行了验证, 结果证明了该控制方法的有效性和可行性。

## 1 BBMC 拓扑结构简介

BBMC 主电路拓扑结构如图 1 所示<sup>[1]</sup>。它包括整流级和逆变级两部分, 其整流级为一个三相 PWM 整流电路, 它将三相交流整流成 PWM 调制的直流电压; 而逆变级则是由三个结构相同的 Buck-Boost DC/DC 变换器构成的一个三相 Buck-Boost 逆变器。

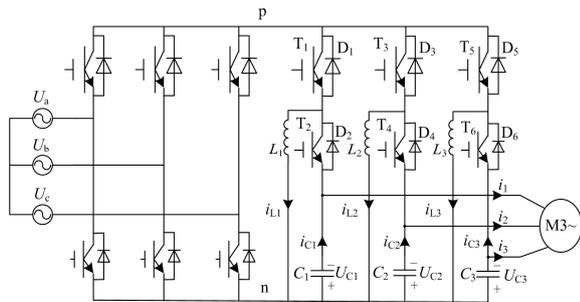


图 1 BBMC 主电路拓扑结构

Fig. 1 BBMC main circuit topology

## 2 异步电机基于 PI-IP 控制的矢量控制算法

在基于 BBMC 的异步电机调速系统中, 针对异步电机采用基于 PI-IP 控制的矢量控制算法, 其控制过程包括转速控制外环和转矩控制内环, 其中转速控制外环采用 PI-IP 控制, 转矩控制内环采用矢量控制。

PI-IP 控制兼有 PI 控制和 IP 控制的优点, 具有响应快、控制灵活、抗干扰性强、鲁棒性好等特点<sup>[20-21]</sup>。将该控制算法应用于异步电机的转速控制外环, 其基本原理如图 2 所示, 具体过程如下。

1) 根据异步电机的给定转速  $n^*$ , 同时检测其实际转速  $n$ , 得到相应的转速偏差, 如式(1)所示。

$$e = n^* - n \quad (1)$$

2) 根据式(1)所得转速偏差  $e$ , 经 PI-IP 控制算法处理后, 得到异步电机的参考转矩  $T_e^*$ , 如式(2)所示。

$$T_e^* = k_{pi} n^* - k_{ip} n + k_i \int_0^t e dt \quad (2)$$

式中,  $k_{pi}$ 、 $k_i$ 、 $k_{ip}$  为控制系数。

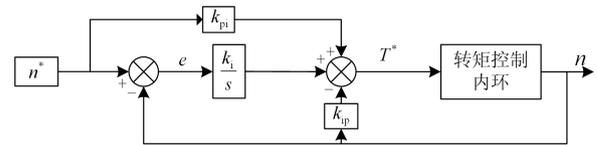


图 2 基于 PI-IP 控制的转速控制外环原理框图

Fig. 2 Speed control loop based on PI-IP control principle diagram

进一步将式(2)采用增量式表示, 则如式(3)所示。

$$T_e^* = k_{pi} [n^*(k) - n^*(k-1)] + k_i e(k) - k_{ip} [n(k) - n(k-1)] \quad (3)$$

以所得参考转矩  $T_e^*$  作为电机转矩控制内环的参考转矩, 并针对转矩控制内环采用矢量控制算法, 从而得到电机相应的给定电压, 根据该电压对电机实施控制, 即可使电机实际转矩与其参考转矩保持一致, 从而实现电机实际转速对给定转速的准确跟踪。

## 3 BBMC 有限时间控制算法

以上述所得电机给定电压作为 BBMC 的参考输出电压, 并以 BBMC 中电容电压与电感电流作为系统控制变量, 采用有限时间控制算法对 BBMC 进行控制, 以实现 BBMC 实际输出电压与其参考输出电压基本保持一致, 达到对异步电机实施高性能调速控制的目的。具体过程如下。

### 3.1 建立系统状态微分方程

根据 BBMC 中功率开关分别处于导通和关断两种状态并根据基尔霍夫定律, 建立 BBMC 的状态微分方程, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_L = -\frac{u_C}{L} + \frac{u_C + u_D}{L} d \\ \dot{u}_C = \frac{i_L}{C} - \frac{i_L}{C} - \frac{i_L}{C} d \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_C$  为电容电压;  $i_L$  为电感电流;  $u_D$  为 BBMC 直流侧电压;  $i_1$  为 BBMC 的输出电流;  $L$  和  $C$  分别为 BBMC 逆变级电感参数和电容参数;  $d$  为 BBMC 逆变级中功率开关的占空比,  $d \in [0,1]$ 。

建立异步电机单相定子绕组等效电路的微分方程, 如式(5)所示。

$$\dot{i}_1 = \frac{i_1 R}{L_1} - \frac{u_C}{L_1} + \frac{u_{DZ}}{L_1} \quad (5)$$

式中:  $u_{DZ}$  为异步电机三相定子绕组公共端电压;  $R$  和  $L_1$  分别为异步电机单相定子绕组的等效电阻与电感。

由式(4)和式(5)即构成了系统的状态微分方程。

### 3.2 获取 BBMC 中电感电流参考值

对于单相 Buck-Boost DC/DC 变换器来说, 当系统达到稳态时, 其电容电压  $u_C$  与输入直流电压  $u_D$  间的关系有

$$u_C = \frac{d}{1-d} u_D \quad (6)$$

根据 Buck-Boost 变换器的工作原理可知, 在一个开关周期内, 负载电流  $i_1$  与开关管  $T_1$  关断时电感的平均电流相等, 即

$$i_1 = (1-d)i_L \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得

$$i_L = \frac{i_1(u_C + u_D)}{u_D} \quad (8)$$

式中,  $i_1 = \frac{u_C - u_{DZ}}{R + j\omega L_1}$ , 所以有

$$i_L = \frac{(u_C - u_{DZ})(u_C + u_D)}{u_D(R + j\omega L_1)} \quad (9)$$

当电容电压  $u_C$  达到其参考值  $u_{Cref}$  时, 可得电感电流  $i_L$  的参考值  $i_{Lref}$  为

$$i_{Lref} = \frac{(u_{Cref} - u_{DZ})(u_{Cref} + u_D)}{u_D(R + j\omega L_1)} \quad (10)$$

### 3.3 BBMC 有限时间控制算法研究

以 BBMC 中电感电流与电容电压作为系统控制变量, 建立系统的储能函数为

$$x_1 = \frac{Li_L^2}{2} + \frac{C(u_C + u_D)^2}{2} \quad (11)$$

针对式(11)分别求一阶和二阶导数, 得

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = u_D i_L - (u_C + u_D) i_1 \quad (12)$$

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_2 = \left[ \frac{u_D(u_D + u_C)}{L} - \frac{i_L i_1}{C} \right] d - \frac{u_D u_C}{L} - \frac{(i_L - i_1) i_1}{C} - \frac{(u_C + u_D)(i_1 R - u_C + u_{DZ})}{L} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)即构成了系统动态方程, 重新列出如式(14)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = u_D i_L - (u_C + u_D) i_1 \\ \dot{x}_2 = \left[ \frac{u_D(u_D + u_C)}{L} - \frac{i_L i_1}{C} \right] d - \frac{u_D u_C}{L} - \frac{(i_L - i_1) i_1}{C} - \frac{(u_C + u_D)(i_1 R - u_C + u_{DZ})}{L} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (14)$$

分别以系统储能函数  $x_1$  与其参考变量  $x_{1ref}$  的偏差  $\lambda_1$  及其一阶导数  $x_2$  与其参考变量  $x_{2ref}$  的偏差  $\lambda_2$  为目标变量, 即  $\lambda_1 = x_1 - x_{1ref}$ ,  $\lambda_2 = x_2 - x_{2ref}$ , 建立系统动态误差方程, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1 = \lambda_2 \\ \dot{\lambda}_2 = u \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $u$  为控制函数。

由目标变量  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  及式(15), 并根据有限时间控制原理<sup>[12]</sup>, 确定系统控制函数  $u$ , 如式(16)所示。

$$u = -k_1 [\text{sat}_{\alpha_1}(\lambda_1) + \lambda_1] - k_2 [\text{sat}_{\alpha_2}(\lambda_2) + \lambda_2] \quad (16)$$

式中,  $\text{sat}$  为饱和函数, 有

$$\begin{cases} \text{sat}_{\alpha_1}(\lambda_1) = \begin{cases} \text{sign}(\lambda_1), & |\lambda_1| > 1 \\ \text{sign}^{\alpha_1}(\lambda_1), & |\lambda_1| \leq 1 \end{cases} \\ \text{sat}_{\alpha_2}(\lambda_2) = \begin{cases} \text{sign}(\lambda_2), & |\lambda_2| > 1 \\ \text{sign}^{\alpha_2}(\lambda_2), & |\lambda_2| \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

要使式(15)对应状态在有限时间内被镇定到原点, 即  $(\lambda_1(t), \lambda_2(t)) \rightarrow 0$ , 则控制参数须满足:  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > 0$ ,  $0 < \alpha_1 < 1$ ,  $\alpha_2 = 2\alpha_1 / (1 + \alpha_1)$ 。

根据系统动态误差方程式(15)和控制函数式(16), 可得 BBMC 中对应功率开关的占空比关系式, 方法如下。

由  $\lambda_2 = x_2 - x_{2ref}$  及式(13), 可得

$$\dot{\lambda}_2 = \dot{x}_2 = \left[ \frac{u_D(u_D + u_C)}{L} - \frac{i_L i_1}{C} \right] d - \frac{u_D u_C}{L} - \frac{(i_L - i_1) i_1}{C} - \frac{(u_C + u_D)(i_1 R - u_C + u_{DZ})}{L} \quad (17)$$

由式(17), 同时根据系统控制函数式(16), 可得

$$u = \left[ \frac{u_D(u_D + u_C)}{L} - \frac{i_L i_1}{C} \right] d - \frac{u_D u_C}{L} - \frac{(i_L - i_1) i_1}{C} - \frac{(u_C + u_D)(i_1 R - u_C + u_{DZ})}{L} \quad (18)$$

由式(18)即可得到系统的占空比函数关系式,

如式(19)所示。

$$d = [CLu_D(u_C + u_D)(Ri_1 - u_C + u_{DZ}) + CL_1u_D(Lu + u_Cu_D) + L_1Li_1^2u_C] / [CL_1(u_C + u_D)(u_D^2 + i_1^2)] \quad (19)$$

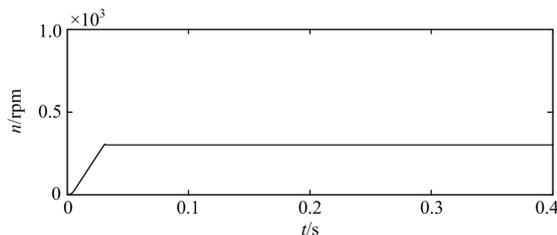
根据式(19)所得占空比并结合相应的开关周期输出相应的控制信号控制 BBMC 中对应功率开关的开关状态, 即可在 BBMC 输出端获得与其参考输出一致的输出电压。

#### 4 仿真研究

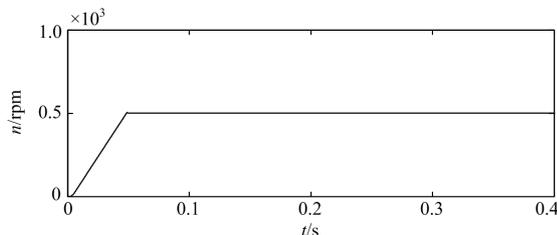
采用 Matlab 构建基于 BBMC 的异步电机调速系统仿真模型, 仿真参数设置如下: 输入为对称三相电源, 其相电压有效值与频率分别取 220 V/50 Hz; 电感与电容分别取  $L_f=140 \mu\text{H}$ ,  $C_f=450 \mu\text{F}$ ,  $i=1\sim 3$ ; 异步电机额定功率、额定转速、额定转矩和额定电压分别取  $P_N=1.1 \text{ kW}$ ,  $n_N=1390 \text{ rpm}$ ,  $T_N=7.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $U_N=380 \text{ V}$ ; 转速调节器参数分别取  $k_{pi}=0.23$ ,  $k_i=0.05$ ,  $k_{ip}=1.21$ ; 电流调节器参数分别取  $k_{pj}=23.5$ ,  $k_j=4256$ ,  $j=1\sim 2$ ; 有限时间控制参数分别取  $k_1=0.25$ ,  $k_2=1.1$ ,  $\alpha_1=1/5$ ,  $\alpha_2=1/3$ ; PWM 开关频率取 20 kHz。为验证基于 BBMC 的异步电机调速系统的调速性能, 仿真分稳态分析和动态分析两种情况进行。

(1) 稳态分析。稳态分析在于验证电机对给定转速的跟踪情况。电机带负载运行, 设负载转矩为  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 电机给定转速分别取 300 rpm、500 rpm 和 800 rpm, 电机实际转速的仿真波形如图 3 所示, 仿真结果见表 1。

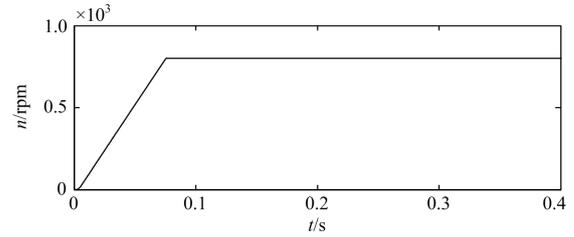
(2) 动态分析。动态分析在于验证调速系统在运行中当给定转速或负载发生突变时系统的运行情况,



(a) 给定转速300 rpm仿真波形



(b) 给定转速500 rpm仿真波形



(c) 给定转速800 rpm仿真波形

图 3 电机稳态运行转速波形

Fig. 3 Motor steady-state running speed waveform

表 1 电机稳态运行仿真结果

Table 1 Motor steady-state operation simulation results

给定转速/rpm	实际转速/rpm	相对误差/%
300	299.7	0.10
500	499.6	0.08
800	799.1	0.11

以此来评价系统的动态性能。

① 给定转速突变。电机带负载运行, 设负载转矩为  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 电机给定转速初值取 800 rpm, 在 0.15 s 时调至 500 rpm, 在 0.3 s 时又调至 800 rpm, 相应的仿真波形如图 4 所示。图 4 中分别给出了电机实际转速、输入相电压及电磁转矩的波形。由图 4 可见, 在电机启动至 0.075 s 时, 其转速即达到给定转速 800 rpm; 在 0.15 s 将给定转速调至 500 rpm 时, 电机经 0.025 s 的过渡过程即达到新的给定转速; 之后在 0.3 s 给定转速又调至 800 rpm 时, 电机在经过 0.024 s 后再次达到新的给定转速; 在给定转速发生突变时, 电机输入相电压波形有小幅抖动, 响应时间分别为 0.075 s、0.025 s、0.024 s, 电磁转矩会产生一定的超调, 响应时间分别为 0.082 s、0.032 s、0.030 s, 在电机转速达到新的给定转速后, 两者波形均恢复平稳。

② 负载突变。设电机给定转速为 800 rpm, 负载转矩初值取  $0 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 在 0.2 s 时突加负载至  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 相应的仿真波形如图 5 所示。可见, 在负载发生突变时, 电机转速波形基本无变化, 输入相电压随负载变化而迅速作出相应的调整, 响应时间为 0.010 s, 电磁转矩则经小幅超调后能迅速达到新的稳态, 响应时间为 0.023 s。给定转速突变输入相电压和电磁转矩响应时间如表 2 所示。

(3) 仿真分析。由图 3—图 5 所示仿真波形及表 1 和表 2 所得仿真结果, 可见:

① 电机带负载稳态运行, 电机给定转速分别取 300 rpm、500 rpm 及 800 rpm 时, 其实际转速分别为 299.7 rpm、499.6 rpm 及 799.1 rpm, 其相对误差分别为 0.10%、0.08%及 0.11%, 可见电机实际转速

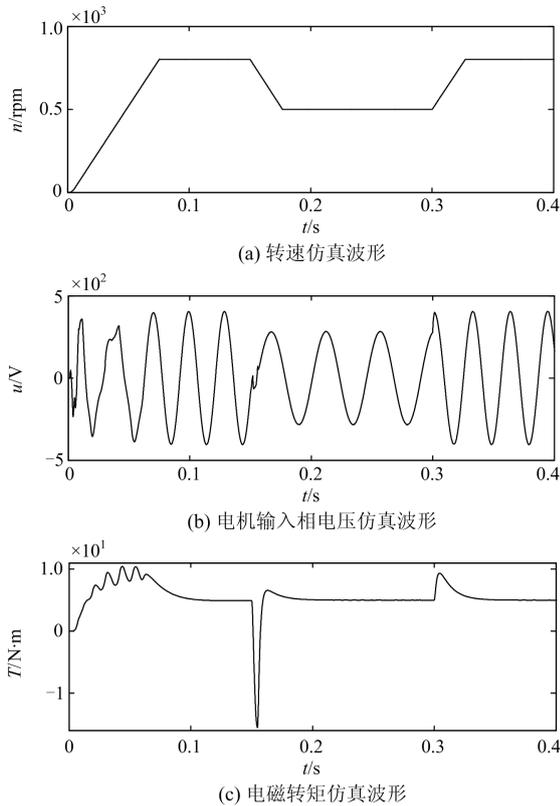


图 4 给定转速突变时电机运行状态波形

Fig. 4 Motor running state waveform when a given speed is abrupt

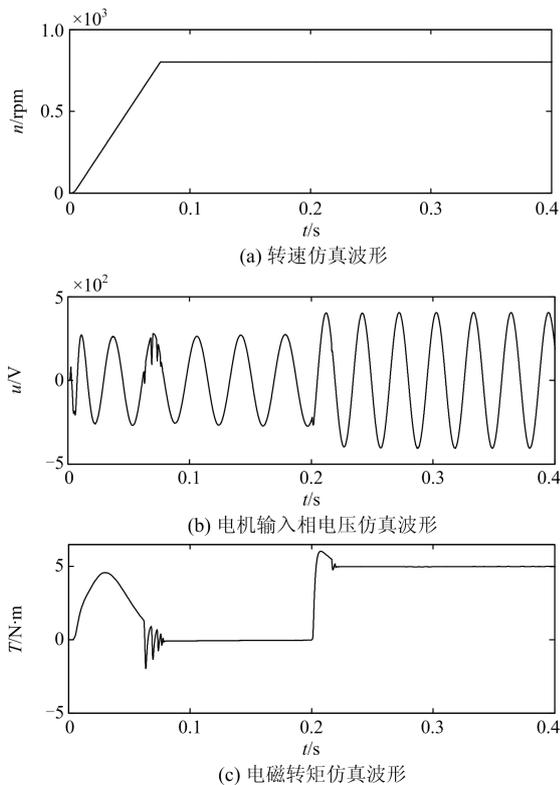


图 5 负载突变时电机运行状态波形

Fig. 5 Motor running state waveform when load is abrupt

表 2 给定转速突变输入相电压和电磁转矩响应时间

Table 2 Abrupt input phase voltage and electromagnetic torque response time at given rotational speed

次序	输入相电压响应时间/s	电磁转矩响应时间/s
1	0.075	0.082
2	0.025	0.032
3	0.024	0.030

实现了对给定转速的准确跟踪。

② 电机给定转速发生突变时,电机实际转速经短暂的过渡过程后即达到新的给定转速,转速调节过程平稳,无超调或抖动现象,电机输入相电压响应时间分别为 0.075 s、0.025 s、0.024 s,电磁转矩响应时间分别为 0.082 s、0.032 s、0.030 s,说明系统具有良好的调速性能。

③ 电机带负载发生突变时,电机转速基本不受影响,而电机输入相电压和电磁转矩能迅速达到新的稳态,说明系统具有较好的带负载能力。

## 5 实验验证

为进一步验证上述理论分析的正确性,构建相应的实验装置如图 6 所示。包括由 DSP 和 FPGA 构成的系统控制器、BBMC、速度传感器、电压采样电路、转矩传感器、变压器、三相异步电机及负载电机等。三相输入电源的相电压有效值与频率分别取: 220 V/50 Hz; 为便于与仿真作对比分析,实验装置中所取电感、电容、电机参数及相关控制参数与仿真一致。

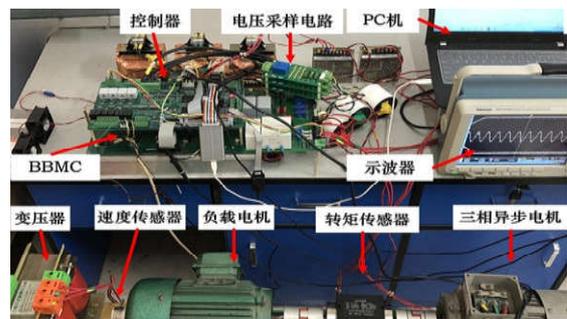
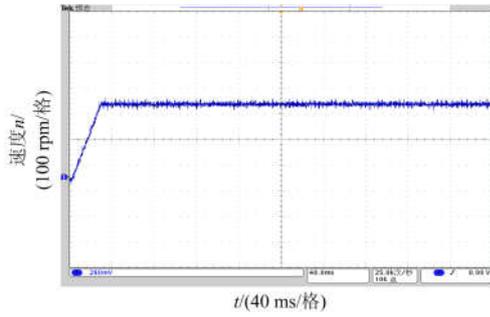


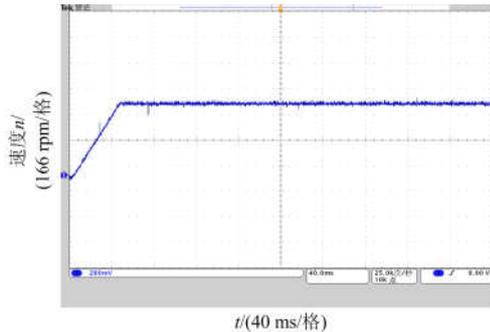
图 6 调速系统装置

Fig. 6 Speed control system device

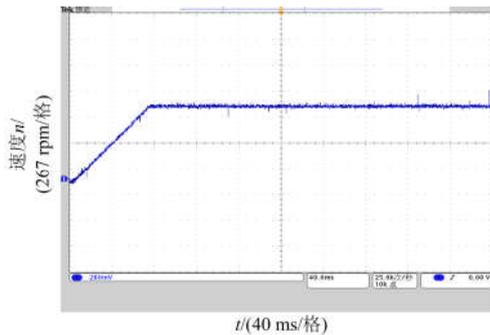
根据上述构建的实验电路,针对基于 BBMC 的异步电机调速系统进行实验分析,与仿真分析对应,实验过程也分为稳态和动态两种情况进行,同时实验时所设置的相关实验参数也与仿真时一致,得到相应的实验波形分别如图 7—图 9 所示,电机稳态运行实验结果见表 3。



(a) 给定转速 300 rpm 波形



(b) 给定转速 500 rpm 波形



(c) 给定转速 800 rpm 波形

图 7 给定转速恒定的实验波形

Fig. 7 Given a constant rotational speed of the experimental waveform

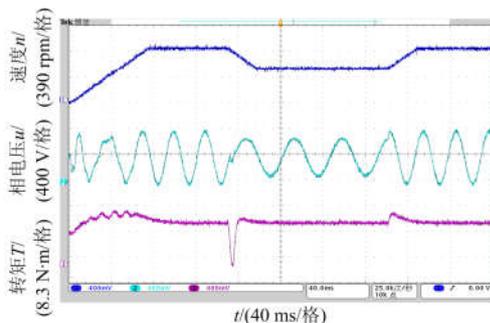


图 8 给定转速突变的实验波形

Fig. 8 Experimental waveform for a given sudden change in speed

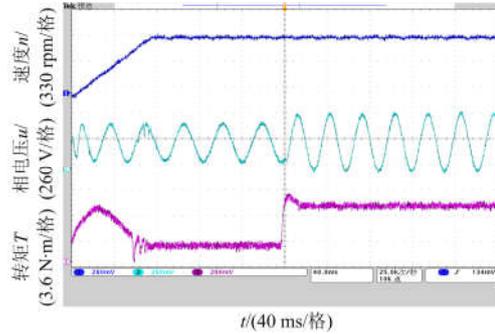


图 9 负载发生突变的实验波形

Fig. 9 Experimental waveform with sudden load

表 3 电机稳态运行实验结果

Table 3 Motor steady state operation test results

给定转速/rpm	实际转速/rpm	相对误差/%
300	297.8	0.70
500	496.8	0.64
800	794.1	0.74

分别对比图 7—图 9 与图 3—图 5 及表 1—表 3, 可见: 实验波形与仿真波形及实验结果与仿真结果基本吻合, 因此进一步验证了基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速系统控制策略的有效性和可行性。

## 6 结论

针对基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速系统, 提出一种基于有限时间控制的调速控制方法。建立了系统的数学模型, 研究了调速系统基于有限时间控制的具体实现方法, 并通过仿真和实验对上述控制方法的效果进行了验证。结果表明, 基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速系统采用有限时间控制方法具有稳态跟踪误差小、动态性能好、抗干扰能力强等优点。

## 参考文献

- [1] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 一种新型 Buck-Boost 矩阵变换器[J]. 信息与控制, 2008, 37(1): 40-45. ZHANG Xiaoping, ZHU Jianlin, TANG Huaping, et al. A novel Buck-Boost matrix converter[J]. Information and Control, 2008, 37(1): 40-45.
- [2] ALSUMIRI M, LI Liuying, JIANG Lin, et al. Residue theorem based soft sliding mode control for wind power generation systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 247-258. DOI: 10.1186/s41601-018-0097-x.
- [3] 郑连清, 彭一. 电压型 buck-boost 变换器的混沌控制[J]. 物理学报, 2016, 65(22): 207-217. ZHENG Lianqing, PENG Yi. Chaos control of voltage-type buck-boost converter[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(22): 207-217.

- [4] 皇甫宜耿, 吴宇, 马瑞卿. 一种鲁棒无抖颤滑模控制的 Buck-Boost 变换器[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(2): 285-289.  
HUANG Yigeng, WU Yu, MA Ruiqing. A Buck-Boost converter with robust sliding mode control[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(2): 285-289.
- [5] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [6] XU Q. Adaptive discrete-time sliding mode impedance control of a piezoelectric microgripper[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 663-673.
- [7] 龚臣, 谢运祥, 邓衍平, 等. 基于 Buck-Boost 逆变器的离散滑模控制仿真研究[J]. 通信电源技术, 2005, 22(2): 9-13.  
GONG Chen, XIE Yunxiang, DENG Yanping, et al. Simulation of discrete sliding mode control based on Buck-Boost inverter[J]. Telecom Power Technology, 2005, 22(2): 9-13.
- [8] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 基于离散滑模控制的新型 Buck-Boost 矩阵变换器[J]. 高技术通讯, 2008, 18(2): 179-183.  
ZHANG Xiaoping, ZHU Jianlin, TANG Huaping, et al. A novel Buck-Boost matrix converter based on discrete sliding mode control[J]. Chinese High Technology Letters, 2008, 18(2): 179-183.
- [9] 岳舟. 离散滑模控制的 Buck-Boost 光伏逆变器研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(2): 233-238.  
YUE Zhou. Research on Buck-Boost photovoltaic inverter with discrete sliding mode control[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(2): 233-238.
- [10] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 新型 Buck-Boost 矩阵变换器的双闭环控制策略[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 203-208.  
ZHANG Xiaoping, ZHU Jianlin, TANG Huaping, et al. Double closed-loop control strategy for a new Buck-Boost matrix converter[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(2): 203-208.
- [11] 江法洋, 郑丽君, 宋建成, 等. LCL 型并网逆变器重复双闭环控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2944-2954.  
JIANG Fayang, ZHENG Lijun, SONG Jiancheng, et al. Repeated double closed loop control method for LCL grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2944-2954.
- [12] 梁鼎, 张小平. 新型 Buck-Boost 矩阵变换器的自抗扰控制策略[J]. 仪表技术与传感器, 2013(4): 77-80.  
LIANG Ding, ZHANG Xiaoping. Active disturbance rejection control strategy for a novel Buck-Boost matrix converter[J]. Instrument Technology and Sensors, 2013(4): 77-80.
- [13] 马星河, 张少辉, 李自强, 等. 一种用于矩阵变换器的简化非线性自抗扰控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 48-54.  
MA Xinghe, ZHANG Shaohui, LI Ziqiang, et al. A simplified nonlinear auto disturbance rejection control strategy for matrix converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 48-54.
- [14] 李正明, 高远, 潘天红. 基于复合控制的有源电力滤波器电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 55-61.  
LI Zhengming, GAO Yuan, PAN Tianhong. Compensation current control of APF based on compound control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 55-61.
- [15] 张小平, 唐水平, 周兰, 等. Buck-Boost 矩阵变换器的复合控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 931-936.  
ZHANG Xiaoping, TANG Shuiping, ZHOU Lan, et al. Composite control strategy for Buck-Boost matrix converters[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(6): 931-936.
- [16] 陈磊, 季亮, 杨兴武, 等. LCL 型并网逆变器新型频率自适应重复控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 57-64.  
CHEN Lei, JI Liang, YANG Xingwu, et al. A new frequency adaptive repetitive control approach for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 57-64.
- [17] HAIMO V T. Finite time controllers[J]. Siam Journal on Control & Optimization, 1986, 24(4): 760-770.
- [18] 孙振兴, 李世华, 张兴华. 基于扩张状态观测器和有限时间控制的感应电机直接转矩控制[J]. 控制理论与应用, 2014(6): 748-756.  
SUN Zhenxing, LI Shihua, ZHANG Xinghua. Direct torque control of induction motor eased on extended state observer and finite time control[J]. Control Theory & Applications, 2014(6): 748-756.
- [19] WANG J, LI S, YANG J, et al. Finite-time disturbance observer based non-singular terminal sliding-mode control for pulse width modulation based DC-DC buck converters with mismatched load disturbances[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(9): 1995-2002.
- [20] RABIAA O, MOUNA B H, MEHDI D, et al. Scalar speed control of dual three phase induction motor using PI and IP controllers[C] // International Conference on Green Energy Conversion Systems, Hammamet, Tunisia, 2017: 1-6.
- [21] YANG M, TANG S, XU D. Comments on antiwindup strategy for pi-type speed controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1329-1332.

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2019-01-04

作者简介:

刘继(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统及控制; E-mail: 1016129943@qq.com

张小平(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等; E-mail: zxp836@163.com

张瑞瑞(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统及控制。E-mail: 136475246@qq.com

(编辑 魏小丽)