

基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速控制策略^①

张小平^② 尹 翔 刘士亚

(湖南科技大学先进矿山装备教育部工程研究中心 湘潭 411201)

摘要 进行了将采用双闭环控制的 Buck-Boost 矩阵变换器用于异步电机调速系统控制的研究,设计了基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速控制策略。该策略根据异步电机的给定转速,基于矢量控制原理获得异步电机对应的输入电压,并以该电压作为 Buck-Boost 矩阵变换器的参考输出电压,再通过对 Buck-Boost 矩阵变换器采用双闭环控制策略使其实际输出电压与其参考输出电压保持一致,从而实现异步电机的实际转速对给定转速的准确跟踪,达到准确控制异步电机转速的目的。该控制策略的控制效果通过仿真得到了验证。仿真分析结果表明,异步电机采用基于 Buck-Boost 矩阵变换器的调速控制策略可取得良好的动态和稳态性能以及四象限运行特性,因而具有较好的应用价值。

关键词 Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC), 异步电机, 转速调节, 控制策略, 仿真

0 引言

矩阵变换器(matrix converter, MC)是一种具有简单拓扑结构的新型电力变换器^[1, 2], 它有一系列理想的电气特性, 但存在电压传输比低等缺陷, 由此限制了其推广应用^[3, 4]。研究显示, 通过改变其控制策略可有效提高其电压传输比^[5-7], 但同时也带来了输出谐波过大等不良后果。为此, 文献[8]从改变矩阵变换器主电路拓扑结构出发进行了研究, 提出了一种新型的升降压式(Buck-Boost)矩阵变换器(Buck-Boost MC, BBMC), 其主电路拓扑结构有效解决了传统矩阵变换器电压传输比低的难题, 能实现输出电压和频率的任意调节, 同时还具有输入电流正弦、输入功率因数可调等电气特性。针对该拓扑结构, 文献[9]采用双闭环控制策略进行控制, 取得了良好的控制效果。由于 Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC)具有优良的电气性能, 因而可作为交流电机调速领域的电力变换器。本文基于异步电机矢量控制原理进行了这方面的研究, 提出了以 BBMC 为变频器的异步电机调速系统的控制策略, 其控制效果通过仿真得到了验证。

1 BBMC 的拓扑结构

三相-三相 BBMC 的拓扑结构如图 1 所示^[9], 该结构采用 AC-DC-AC 两级变换器的结构形式, 其整

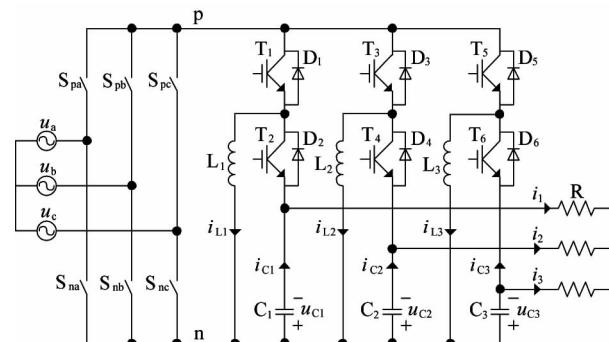


图 1 三相-三相 BBMC 拓扑结构

流级为一个 3/2 相矩阵变换器, 它将三相交流整流成脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)的直流电压; 逆变级则采用三相 Buck-Boost 逆变器的结构形式, 它由三个电流可双向流动的 Buck-Boost DC-DC 变换器组成, 其特点是通过调节占空比可实现其交流输出电压的任意调节。

① 国家自然科学基金(51477047)和湖南省产学研结合创新平台(2010XK6066)资助项目。

② 男, 1966 生, 博士, 教授; 研究方向: 电力电子与电力传动; 联系人, E-mail: zxp836@163.com
(收稿日期: 2013-11-16)

2 双闭环控制策略

对 BBMC 采用双闭环控制策略进行控制^[9],取得了良好的控制效果。该控制策略由电感电流控制内环和电容电压控制外环组成。

电感电流控制内环如图 2 所示。该控制环以电感电流的参考值 $i_{L1\text{ref}}$ 与其实际值 i_{L1} 进行比较,其偏差经 PI 运算得电感电压参考值 $U_{L1\text{ref}}$,再通过检测电容电压 U_{C1} 和直流侧电压 U_{dc} ,由式

$$d_1 = \frac{U_{C1} + U_{L1\text{ref}}}{U_{C1} + U_{dc}} \quad (1)$$

即可求得占空比 d_1 ,将 d_1 经限幅后作用于 Buck-Boost 逆变器,控制其功率开关 T_1 和 T_2 的导通时间,从而调节电感电流使其按参考值变化。

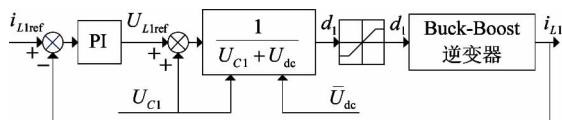


图 2 电感电流控制内环原理框图

电容电压控制外环如图 3 所示。该控制环以电容电压的参考值 $U_{C1\text{ref}}$ 与其实际值 U_{C1} 进行比较,其偏差经 PI 运算得电容电流参考值 $i_{C1\text{ref}}$,再通过检测输出电流 i_1 ,由式

$$i_{L1\text{ref}} = \frac{(i_{C1\text{ref}} - i_1) \cdot (U_{C1} + \bar{U}_{dc})}{\bar{U}_{dc}} \quad (2)$$

即可求得内环电感电流的参考值 $i_{L1\text{ref}}$,将 $i_{L1\text{ref}}$ 经限幅后作用于控制内环,进而由内环通过改变占空比 d_1 调节电感电流和电容电压,使电容电压按设定的参考值变化,从而达到控制输出电压的目的。

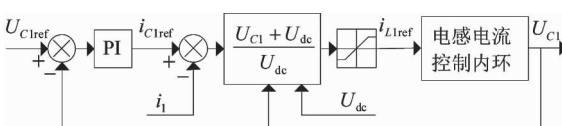


图 3 电容电压控制外环原理框图

3 基于 BBMC 的异步电机调速控制

基于 BBMC 的异步电机调速控制系统原理框图如图 4 所示。该控制系统根据异步电机的给定转速,通过检测其实际转速及定子电流实际值,基于矢量控制原理求得异步电机对应的输入电压,并以该电压作为 BBMC 逆变级的参考输出电压。再通过对 BBMC 逆变级采用双闭环控制策略使其实际输

出电压与其参考输出电压保持一致,从而实现异步电机的实际转速对给定转速的准确跟踪,达到对异步电机转速进行控制的目的^[10]。

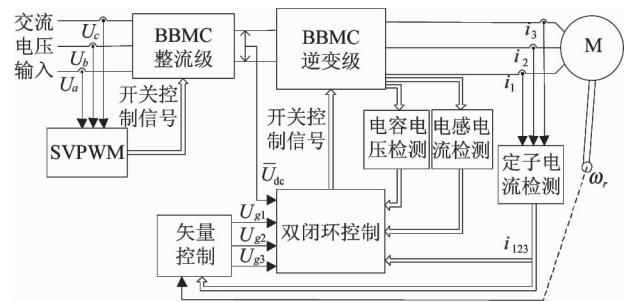


图 4 BBMC 与异步电机集成控制原理框图

图 4 中矢量控制模块的基本原理如图 5 所示。图中 ω_r^* 和 ω_r 分别为给定转速和实际转速检测值; ϕ_r^* 为额定转子磁链; T_e^* 为额定电磁转矩; ϕ_r 为实际转子磁链; θ 为坐标变换夹角; i_d^* 和 i_q^* 分别为定子参考电流的转矩分量和磁链分量; i_d 和 i_q 分别为定子电流检测信号的转矩分量和磁链分量; U_d 和 U_q 分别为参考电压的转矩分量和磁链分量; U_{gi} ($i=1,2,3$) 为求得的异步电机对于给定转速 ω_r^* 所对应的输入电压。

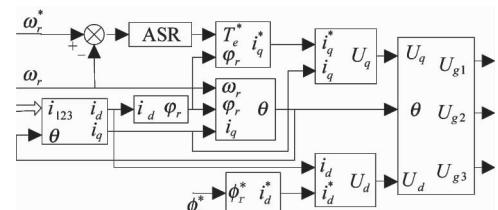


图 5 矢量控制模块原理框图

该控制模块的基本工作原理是:根据给定转速、实际转速和定子电流检测值,由式

$$\begin{cases} i_d^* = \frac{1 + \tau_r p}{L_m} \varphi_r \\ i_q^* = \frac{L_r}{n_p L_m \varphi_r} T_e \\ \omega_s = \frac{L_m i_q^*}{\sigma \varphi_r} \end{cases} \quad (3)$$

可得到 i_d^* 和 i_q^* ,再分别与 i_d 和 i_q 进行比较,其偏差分别经电流调节器运算得到 U_d 和 U_q ,然后再经 2r/3s 变换得到异步电机给定转速对应的输入电压 U_{gi} ($i=1,2,3$),并以该电压作为 BBMC 逆变级的参考输出电压。式中: L_m 为定、转子绕组互感, L_r 为转子绕组电感, n_p 为极对数, ω_s 为转差速度, σ 为漏磁系数,其计算公式为 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$,转子时间常

数 $\tau_r = L_r/R_r$ 。

4 仿真分析

采用 MATLAB 构建基于 BBMC 的异步电机调速控制系统的仿真模型^[11-13]。如图 6 所示, 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 220V 和 50Hz; 电感与电容分别取 $L_i = 360\mu\text{H}$ 和 $C_i = 54\mu\text{F}$, ($i = 1, 2, 3$); 异步电机额定功率与额定电压分别取 $P_n = 3730\text{W}$ 和 $U_n = 460\text{V}$; 定子电阻与电感分别取 $R_s = 1.115\Omega$ 和 $L_{1s} =$

2.9974mH; 转子电阻与电感分别取 $R_r = 2.3\Omega$ 和 $L_{1r} = 2.9974\text{mH}$; 互感取 $L_m = 103.7\text{mH}$; 转动惯量与极对数分别取 $J = 0.02\text{N}\cdot\text{m}^2$ 和 $n_p = 2$; 转速调节器参数分别取 $k_p = 258$ 和 $k_i = 8000$; 电流调节器参数分别取 $k_{pj} = 23.5$ 和 $k_{ij} = 4256$ ($j = 1, 2$); 双闭环控制中电压控制环 PI 控制器参数分别取 $k_p = 5.5$ 和 $k_i = 8 \times 10^{-4}$; 电流控制环 PI 控制器参数分别取 $k_p = 50$ 和 $k_i = 1.24 \times 10^{-4}$; PWM 开关频率取 20kHz。为验证基于 BBMC 的异步电机调速控制策略的效果, 仿真分稳态分析和动态分析两种情况进行。

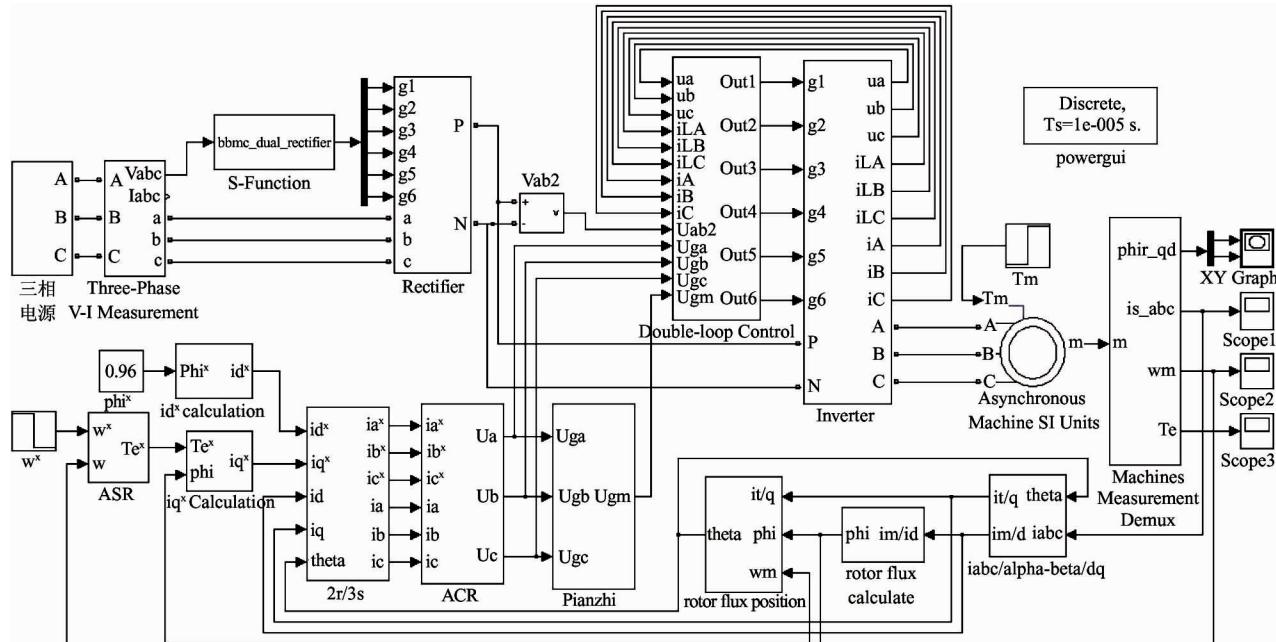


图 6 BBMC 与异步电机集成控制系统仿真模型图

4.1 稳态分析

稳态分析在于验证异步电机实际转速对给定转速的跟踪情况。

设异步电机给定转速 $\omega_r^* = 50\text{rad/s}$, 给定转子磁链 $\phi_r^* = 0.96\text{Wb}$ 。由仿真可得各参数如表 1 所

示, 相应的异步电机输入电压波形(即 BBMC 参考输出电压波形)和 BBMC 实际输出电压波形分别如图 7 和图 8 所示。可见, BBMC 实际输出电压波形与参考电压波形基本保持一致, 异步电机实际转速 ω_r 基本等于给定转速, 实现了对异步电机转速控制的目的。

表 1 系统仿真结果

变量	变量值	变量	变量值
ω_r^*	50rad/s	i_d^*	9.5A
ω_r	49.8rad/s	i_q^*	11A
ϕ_r^*	0.96Wb	i_d	9.2A
T_e^*	19.6N·m	i_q	10.8A
ϕ_r	0.95Wb	U_d	460V
θ	$5\pi/12$	U_q	460V
		U_g	459.6V

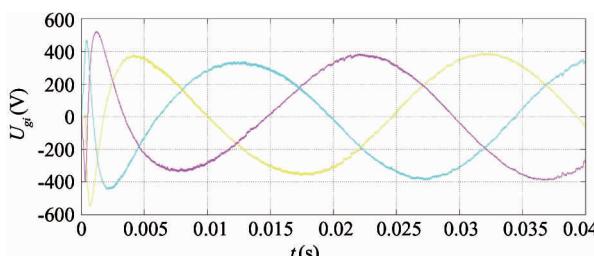


图 7 BBMC 参考输出电压波形

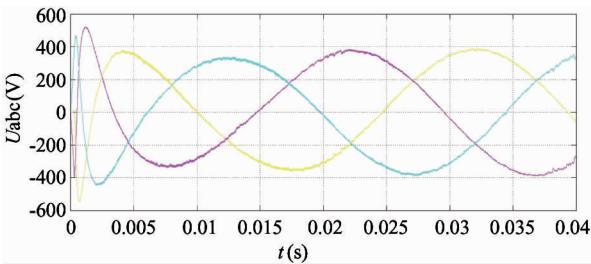


图 8 BBMC 实际输出电压波形

4.2 动态分析

动态分析在于通过负载突变和给定转速突变两种情况来验证系统的动态性能。

4.2.1 负载突变

该仿真用于验证基于 BBMC 的异步电机调速控制系统当负载发生突变时对电机转速的影响。设电机给定转速为 50rad/s , 负载转矩初值取 $0\text{N}\cdot\text{m}$, 在 $t = 0.3\text{s}$ 时突变至 $20\text{N}\cdot\text{m}$, 仿真结果如图 9 所示。可见: 电机空载启动, 在 $t = 0.115\text{s}$ 时达到稳态, 此后电机实际转速稳定跟踪给定转速, 定子电流正弦、电磁转矩脉动较小; 当 $t = 0.3\text{s}$ 时负载突变至 $20\text{N}\cdot\text{m}$,

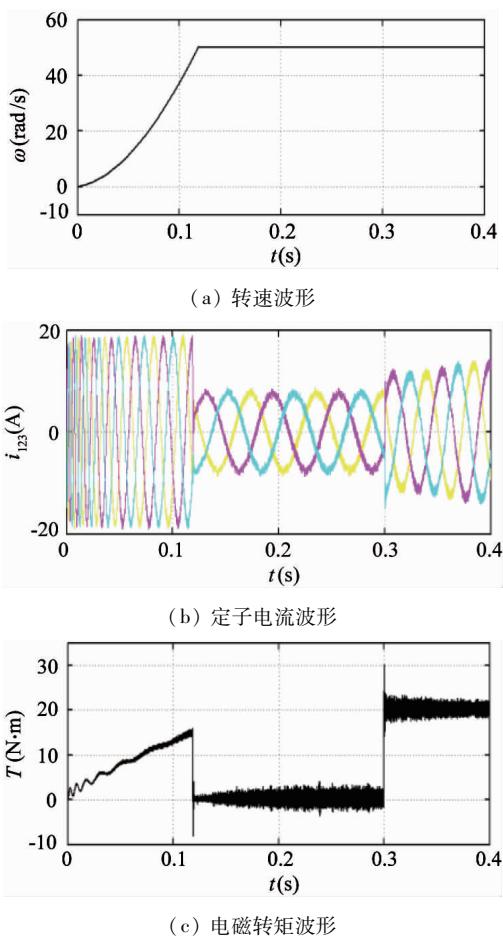


图 9 负载突变时的动态响应波形

转速基本不受影响, 定子电流和电磁转矩均能迅速达到新的稳态。

4.2.2 给定转速突变

该仿真在于验证基于 BBMC 的异步电机调速控制系统的四象限运行特性。设电机空载运行, 即负载转矩为 $0\text{N}\cdot\text{m}$, 给定转速初值取 50rad/s , 在 $t = 0.3\text{s}$ 时突变至 -50rad/s , 至 $t = 0.5\text{s}$ 时又突变回 50rad/s , 仿真结果如图 10 所示。由图可见: 电机空载启动至 $t = 0.115\text{s}$ 时达到稳态, 电机转速稳定; 至 $t = 0.3\text{s}$ 时给定转速突变至 -50rad/s , 电机经短暂的过渡过程即在 $t = 0.365\text{s}$ 时达到新的稳态; 当 $t = 0.5\text{s}$ 时给定转速又突变至 50rad/s , 电机在 $t = 0.56\text{s}$ 后再次达到新的稳态, 电机实际转速稳定跟踪给定转速的变化。

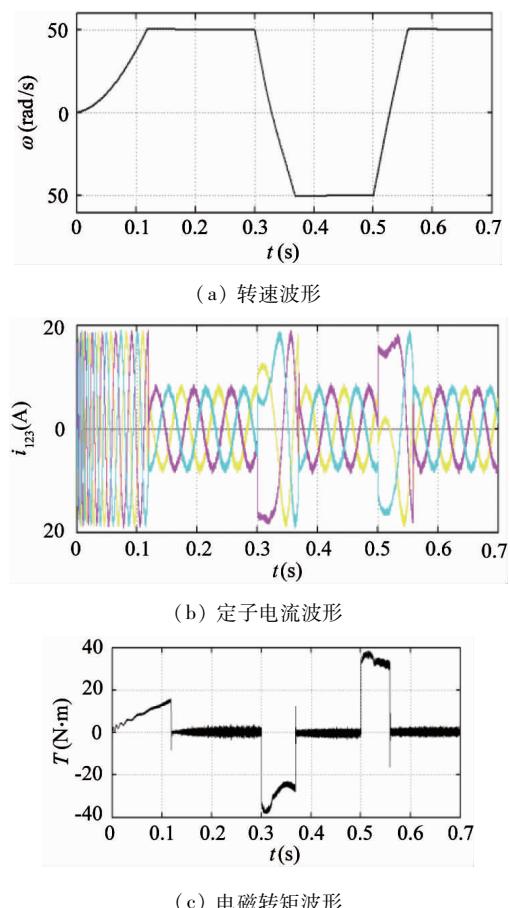


图 10 给定转速突变时的动态响应波形

5 结论

本研究设计了基于 Buck-Boost 矩阵变换器 (BBMC) 的异步电机调速控制策略, 所用 BBMC 采用双闭环控制, 具有良好的性能。对这一控制策略

的设计方法及其控制效果进行仿真验证的结果表明,该控制策略使异步电机的调速控制系统具有良好的稳态和动态性能,能够准确控制异步电机的转速,因而具有较好的应用价值。

参考文献

- [1] Wang X W, Lin H, She H W, et al. A research on space vector modulation strategy for matrix converter under abnormal input-voltage conditions. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012, 59(1) : 93-104
- [2] Sun Y, Su M, Li X, et al. A general constructive approach to matrix converter stabilization. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2013, 28(1) : 418-431
- [3] Li S M, Lu J, Zhong Y R. An over-modulation in matrix converter based on limit-trajectory. *Transactions of China Electrotechnical society*, 2012, 27(6) : 110-117
- [4] 张小平, 唐华平, 朱建林等. 新型 Boost 矩阵变换器及其实验研究. 仪器仪表学报, 2008, 29 (10) : 2116-2120
- [5] 朱建林, 张建华, 郭有贵等. 过调制矩阵变换器的电压传输特性及谐波分析. 中国电机工程学报, 2007, 27(10) : 110-113
- [6] 粟梅, 李丹云, 孙尧等. 双级矩阵变换器的过调制策略. 中国电机工程学报, 2008, 28(3) : 47-52
- [7] 戴钱坤, 葛红娟, 李光泉. 基于多轨迹矢量加权的矩阵变换器过调制策略. 电工技术学报, 2011, 26(4) : 100-106
- [8] 张小平, 朱建林, 唐华平等. 一种新型 Buck-Boost 矩阵变换器. 信息与控制, 2008, 37(1) : 40-45
- [9] 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. 控制理论与应用, 2009, 26(2) : 203-208
- [10] 周明磊, 游小杰, 王琛琛. 电力机车牵引传动系统矢量控制. 电工技术学报, 2011, 26(9) : 110-115
- [11] 刘欢, 樊后世, 魏立峰. 基于 Matlab/Simulink 异步电机矢量控制系统仿真. 仪器仪表学报, 2006, 27(6) : 1999-2000
- [12] 王敏, 万文, 赵延林. 基于 MATLAB 的岩体结构面曲线模拟及其分形研究. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(2) : 12-15
- [13] 黄良沛, 刘萌, 罗忠诚. 矿用电动挖掘机直流调速系统的仿真建模与分析. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1) : 30-34

A Buck-Boost matrix converter based strategy for control of the rotating speed of asynchronous motors

Zhang Xiaoping, Yin Xiang, Liu Shiya

(Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment of Ministry of Education,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract

The study applied the Buck-Boost matrix converter (BBMC) using a double-loop control strategy to the regulation of an asynchronous motor's rotating speed, and put forward a BBMC-based control strategy for the speed adjusting system of asynchronous motors. When using the strategy, the corresponding input voltage of an asynchronous motor is obtained according to the given speed and the vector control principle, and this input voltage is used as the output voltage reference of the Buck-Boost matrix converter. And then, the actual output voltage is regulated by a double-loop control strategy to achieve the accurate tracking of the given speed. The effectiveness of the proposed control strategy was verified by simulation. The simulation results show that the good dynamic and steady-state performance of an asynchronous motor in four-quadrant operation can be obtained when the proposed control strategy is used, thus it has the good value in application.

key words: Buck-Boost matrix converter (BBMC), asynchronous motor, rotating speed regulation, control strategy, simulation