

# 基于神经元 PID 控制的 Buck-Boost 矩阵变换器研究<sup>①</sup>

岳 舟<sup>②</sup>

(湖南人文科技学院 能源与机电工程系 娄底 417001)

**摘要** 在研究矩阵变换器的拓扑结构、工作原理和分析神经元 PID 控制机制及其学习算法的基础上,将基于专家调节增益的神经元 PID 控制策略引入到 Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC)的双闭环控制系统中,实现了一种具有优良电气特性的新型 Buck-Boost 矩阵变换器。利用 MATLAB 仿真软件对这种新型 BBMC 的控制效果进行了验证,验证结果表明:当其输入侧电压发生突变时,神经元 PID 能有效调节 PID 参数,使其输出电压有效地跟随输入电压的变化,从而迅速达到稳定,表现出了良好的动态性能和鲁棒性。

**关键词** 神经元 PID, Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC), 专家调节增益, 双闭环控制

## 0 引言

矩阵变换器(matrix converter, MC)是一种直接变换型的交流-交流电力变换装置,它可以实现相数、相位、幅值、频率等交流电参数的变换,具有一系列理想电气特性,但由于存在电压传输比低的问题而影响了其推广应用<sup>[1]</sup>。为此,文献[2]从改变矩阵变换器主电路拓扑结构出发进行研究,提出了一种新型的 Buck-Boost 矩阵变换器(BBMC),BBMC 采用双闭环控制策略,有效解决了电压传输比低的问题。为提高 Buck-Boost 矩阵变换器的性能,本研究将基于专家调节增益的神经元比例积分微分(PID)控制器引入其闭环控制系统,提高了变换器的稳态、动态性能及鲁棒性。

PID 控制的最大优点是控制机理完全独立于被控对象的数学模型,其控制精髓是借助控制目标与被控对象实际行为之间的误差消除此误差,因而 PID 控制技术在工程实践中得到了广泛应用<sup>[3,4]</sup>。但随着科技的进步和对控制品质要求的提高,传统 PID 控制技术的缺陷日益显现出来。其中最主要的是 PID 控制器参数的整定问题,一旦参数整定设计

好之后,在整个控制过程中都是固定不变的。而实际的控制系统在工作过程中系统参数往往会发生变化,这样控制系统就很难达到最佳的控制效果<sup>[5,6]</sup>。在现代的工业控制过程中,许多被控对象的机理复杂,控制系统不仅具有参数的时变性、严重非线性以及多输入/多输出(MIMO)的强耦合性等特性,而且从被控对象所能获取的信息也相对减少,可是对系统控制性能的要求却日渐提高<sup>[7,8]</sup>。BBMC 就具有上述特性,因而采用传统 PID 控制器难以获得满意的控制效果。基于上述原因,本研究引入了智能 PID 控制,控制思想是将智能控制与传统 PID 控制相结合,利用专家系统和神经网络,将人的智能以非线性控制形式引入到控制器的设计中,使系统在任何运行状态下均能得到远比传统 PID 控制更好的控制性能<sup>[9]</sup>。神经元具有自学习、自适应能力,控制过程中不依赖于控制对象的数学模型<sup>[10,11]</sup>,因而本研究采用基于神经元 PID 控制器对 BBMC 进行闭环控制的方法;运用专家控制对神经元 PID 控制器的增益进行在线调节,以完善控制器的性能;将采用专家调节增益的神经元 PID 控制与双闭环控制相结合的控制方法,应用到 BBMC 的控制策略中。相比

<sup>①</sup> 湖南省科技计划(2014GK2004)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1982 年生,硕士,副教授;研究方向:电力电子与电力传动;联系人,E-mail: yuezhou2000@163.com  
(收稿日期:2015-08-09)

于传统 PID 的闭环控制系统,本研究建立的控制系统的稳态和动态性能良好,且具有较强的鲁棒性。当电网电压或负载变化时,系统在神经元 PID 控制器的调节下,能很好地抑制扰动。该控制系统的可行性和有效性利用 Matlab 仿真软件进行了验证。

## 1 BBMC 拓扑结构及工作原理

BBMC 的拓扑结构如图 1 所示。从图中可以看出,其拓扑结构采用 AC-DC-AC 两级变换器的结构形式,整流级的拓扑结构是一 3/2 相矩阵变换器,与传统交-直-交矩阵变换器的整流级相同。它的 6 个功率开关均为双向开关,这里的双向开关是用两个并联反向二极管的单向功率开关串联构成,整流级的功能是将三相交流变换为脉宽调制(PWM)的直流电压<sup>[12,13]</sup>。逆变级采用的是三相 Buck-Boost 逆变器,它由三个电流可双向流动的 Buck-Boost 变换器组成。逆变级的功能是通过调节占空比,可以任意调节交流输出电压的幅值和频率。

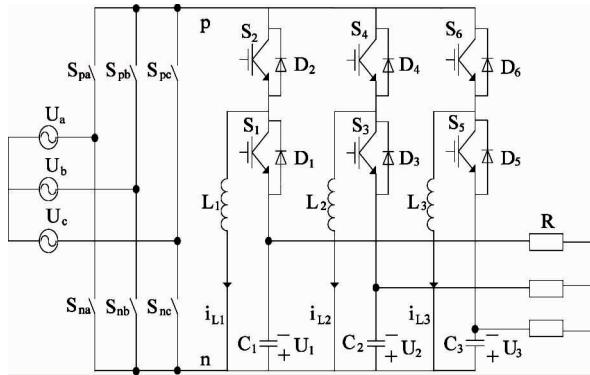


图 1 BBMC 拓扑结构

BBMC 中每一相 Buck-Boost 逆变器的输出电压相对于直流输入的电压增益用下式表示:

$$\frac{u_{o1}}{\bar{u}_{dc}} = \frac{2d - G_m(1-d)}{1-d} \quad (1)$$

式中,  $u_{o1}$  为单相 Buck-Boost 变换器交流输出电压,  $\bar{u}_{dc}$  为直流输入电压,  $G_m$  为最大电压增益 ( $u_{op}/\bar{u}_{dc}$ ),  $u_{op}$  为单相 Buck-Boost 变换器交流输出电压峰-峰值。

## 2 神经元 PID 控制

图 2 是神经元 PID 控制原理框图。图中转换器的输入反映被控过程以及控制设定的状态,  $r$  是设定值,  $y$  是实际输出,  $e$  是系统误差, 经转换器转换成状态量  $x_1, x_2, x_3$ 。这里  $x_1(k) = e(k)$ ,  $x_2(k) = \Delta e(k)$ ,  $x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$ ,  $w_i(k)$  是对应于  $x_i(k)$  的加权系数,  $k$  是神经元的比例系数, 或者称为增益, 且  $k > 0$ 。神经元的控制信号由关联搜索产生, 即

$$\Delta u(k) = K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (2)$$

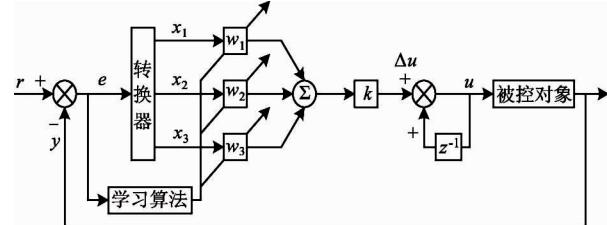


图 2 神经元 PID 控制原理框图

该控制器的自适应和自组织功能通过调整加权系数来实现。采用的是有监督的 Hebb 学习规则, 以调整加权系数, 而加权系数与神经元的输入、输出以及输出偏差的函数有关, 即:

$$w_i(k+1) = (1-c)w_i(k) + \eta r_i(k) \quad (3)$$

$$r_i(k) = e(k)u(k)x_i(k) \quad (4)$$

式中,  $r_i(k)$  是递进信号, 并逐渐衰减,  $e(k)$  是系统误差,  $\eta$  是学习速率, 且  $\eta > 0$ ,  $c$  是常数, 并取  $c \geq 0$ 。

将式(4)代入式(3)有:

$$w_i(k+1) = (1-c)w_i(k) + \eta e(k)u(k)x_i(k)$$

$$\Delta w_i(k) = -c[w_i(k) - \frac{\eta}{c}e(k)u(k)x_i(k)] \quad (5)$$

其中  $\Delta w_i(k) = w_i(k+1) - w_i(k)$ 。

如果存在函数  $f_i(w_i(k), e(k), u(k), x_i(k))$ , 有

$$\frac{\partial f_i}{\partial w_i} = w_i(k) - \frac{\eta}{c}e(k)u(k)x_i(k) \quad (6)$$

则式(5)变换为下式:

$$\Delta w_i(k) = -c \frac{\partial f_i(*)}{\partial w_i(k)} \quad (7)$$

上式表明:加权系数  $w_i(k)$  的修正是按函数  $f_i(*)$  对应于  $w_i(k)$  的负梯度方向进行搜索。根据随机逼近理论可以证明:当  $c$  足够小时,使用以上学习算法,  $w_i(k)$  可以收敛到某一稳定值  $w_i^*$ , 并且它与期望值的偏差将被控制在允许的范围之内。

为保证式(3)和式(7)的收敛性及鲁棒性,规范化处理以上学习算法可得:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \\ w_i(k) &= w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)|, i = 1, 2, 3 \\ w_i(k+1) &= w_i(k) + \eta_p e(k) u(k) x_i(k) \\ w_i(k+1) &= w_i(k) + \eta_i e(k) u(k) x_i(k) \\ w_i(k+1) &= w_i(k) + \eta_d e(k) u(k) x_i(k) \end{aligned} \quad (8)$$

比例、积分和微分系数采用了不同的学习速率,各自的权系数能根据需要进行调整,由仿真与实验确定其取值,并取  $c=0$ 。

神经元 PID 参数的在线学习主要与  $e(k)$  和  $\Delta e(k)$  有关<sup>[14]</sup>。因此,可以修改加权系数学习修正部分。即将其中的  $x_i(k)$  改为  $e(k) + \Delta e(k)$ , 算法如下:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \\ w_i(k) &= w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)|, i = 1, 2, 3 \\ w_i(k+1) &= w_i(k) + \eta_p e(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ w_i(k+1) &= w_i(k) + \eta_i e(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ w_i(k+1) &= w_i(k) + \eta_d e(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \end{aligned} \quad (9)$$

通过算法改进,权系数的在线修正就不再是完全根据神经网络学习原理得到,而是参考实际经验制定。参数调整的规则如下:

(1) 如果系统响应上升时间短,有较大的超调,则减少  $\eta_i$ ,另外几个参数维持不变。

(2) 针对阶跃输入,如果没有超调,上升时间长,则增大  $K, \eta_p, \eta_i, \eta_d$  维持不变;如果输出较大的

超调,甚至出现震荡,则减小  $K, \eta_p, \eta_i, \eta_d$  维持不变。

(3) 如果系统响应上升时间长,增大  $\eta_i$  出现较大的超调,则应适当增加  $\eta_p$ ,另外几个参数维持不变。

(4) 针对阶跃输入,如果系统响应产生多次正弦衰减现象,则应减少  $\eta_p$ ,维持另外几个参数不变。

(5) 在调整初始阶段,  $\eta_d$  应选择较小值,当调整  $\eta_i, \eta_p$  和  $K$  使响应具有良好特性时,再逐渐增加  $\eta_d$ ,而维持另外几个参数不变,使系统的稳态输出基本无纹波。

### 3 专家调节增益控制原理

实践表明,对系统的控制性能有较大影响的是增益  $K$ 。当  $K$  取较小值时,系统响应变慢。 $K$  值太小甚至无法跟踪设定值,对开环增益大的对象, $K$  值应取得小一些,起到衰减神经元的控制作用。当  $K$  取较大值时,系统动态响应迅速,但可能会产生较大的超调。对开环增益较小的对象, $K$  值应取得大一些,以增强神经元的控制作用。根据系统误差和误差的变化率在线调整  $K$  值。如果系统偏差变化量较大,可适当减小  $K$  的变化量。如果系统偏差较大, $K$  取较大值;反之则取较小值<sup>[15]</sup>。

采用专家调整增益  $K$  值的方法,利用基于规则的产生式表示法,按照以下规则来调整:

$$\Delta K(k+1) =$$

$$\begin{cases} a_3 + b_3 |e'(k)|^3 / r(k), & 0.6 < e'(k) \leq 1 \\ a_2 + b_2 |e'(k)| / [2r(k)], & 0.2 < e'(k) \leq 0.6 \\ a_1 + |e'(k)| / r(k), & 0 < e'(k) \leq 0.2 \\ a_0 - |e'(k)| & e'(k) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $r(k)$  是期望输出,  $y(k)$  是系统输出,  $e'(k) = [r(k) - y(k)] / r(k)$  是标么化偏差量,  $K(k+1) = K(k) + \Delta K(k+1)$ 。

在系统响应初期,  $e'(k)$  较大,为了提高系统响应速度,取较大的  $K$  值,因此  $a_3, b_3$  取较大值,使  $K$  值增幅较大。随着  $e'(k)$  变小,  $\Delta K(k+1)$  逐渐减小,须满足  $a_1 \leq a_2 \leq a_3, b_2 \leq b_3$ ,使  $K$  值趋于稳定,以保证系统响应的超调较小。在  $e'(k) < 0$ ,即系统响

应出现超调时,应立即减小  $K$  值,所以  $a_0$  取较小值,使  $\Delta K(k+1)$  为负值。为了保证系统的稳定性,必须对  $K$  进行限幅,设限幅值为  $K_0$ 。根据上述思想,通过大量的仿真研究,得到了参数  $a_0, a_1, a_2, a_3, b_2, b_3, K_0$  的具体取值。增益  $K$  采用此规则调整后,系统性能得到了较大改善,不再出现对超调量、快速性以及抗扰性等要求顾此失彼的情况。

综上所述,可得到一种基于专家调节增益的神经元 PID 控制算法。系统结构如图 3 所示。

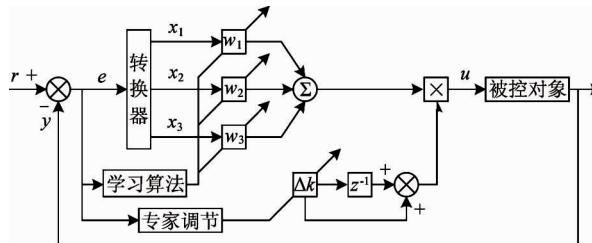


图 3 专家调节增益的神经元 PID 控制系统框图

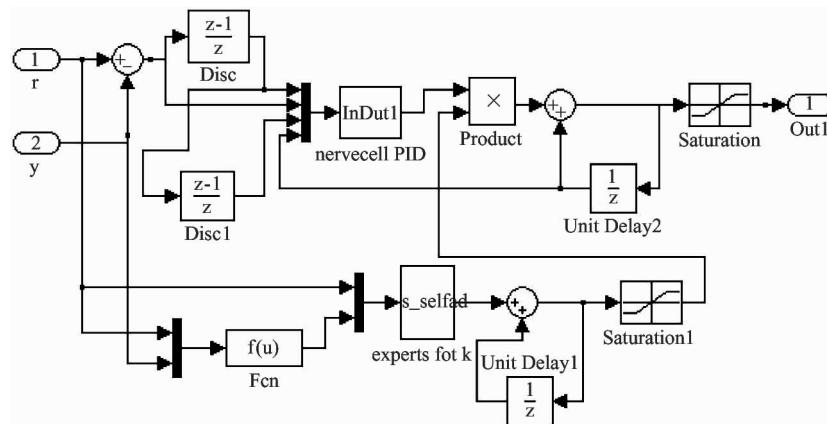


图 4 仿真模型

#### 4.1 稳态仿真

稳态仿真研究在于验证系统对频率和幅值固定的参考信号的跟踪性能。仿真时任取参考相电压分别为 50V/75Hz、100V/50Hz 和 150V/30Hz。仿真结果见表 1(表中的 THD 是总谐波畸变率),中间直流电压仿真波形如图 5 所示,输出线电压仿真波形如图 6 所示。

表 1 输出线电压仿真结果

线电压(V)	频率(Hz)	THD(%)
86.61	75	2.16
174.3	50	1.35
262.2	30	3.74

#### 4 系统仿真研究

神经元 PID 控制器参数( $d, q$  轴控制器参数相同)如下:采样周期  $T_s = 0.1\text{ms}$ , 比例、积分和微分的学习速率  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  分别为 40、2.5、30;专家调节增益模块:  $a_0 = 0.05, a_1 = 0.005, a_2 = 0.02, a_3 = 0.2, b_2 = 0.2, b_3 = 0.2, K_0 = 20$ 。

神经元 PID 控制器的仿真模型由于不能直接用传递函数加以描述,因此用 s 函数编写<sup>[16]</sup>。基于专家调节增益的神经元 PID 控制器仿真模型如图 4 所示。其中,“nervecellPID”模块实现了神经元 PID 控制算法,“experts for k”模块实现了专家调节增益,这两个模块由 s 函数实现。

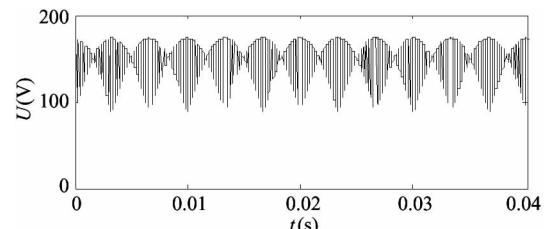


图 5 中间直流电压仿真波形

#### 4.2 动态仿真

动态仿真考核的是:在运行过程中,如果设定的参考输出电压幅值、频率以及系统所加的负载发生变化时,系统的运行情况。这里分两种情况对系统进行仿真验证。

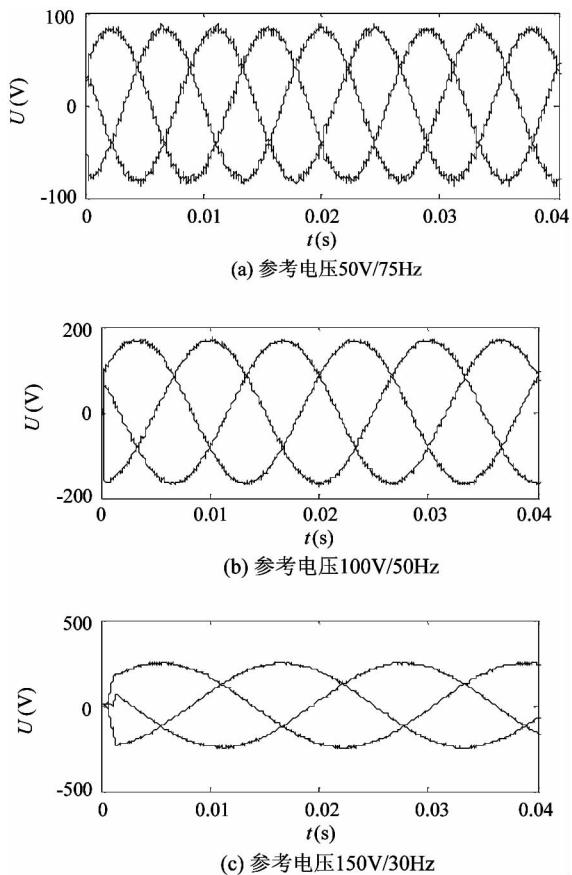


图 6 输出线电压仿真波形

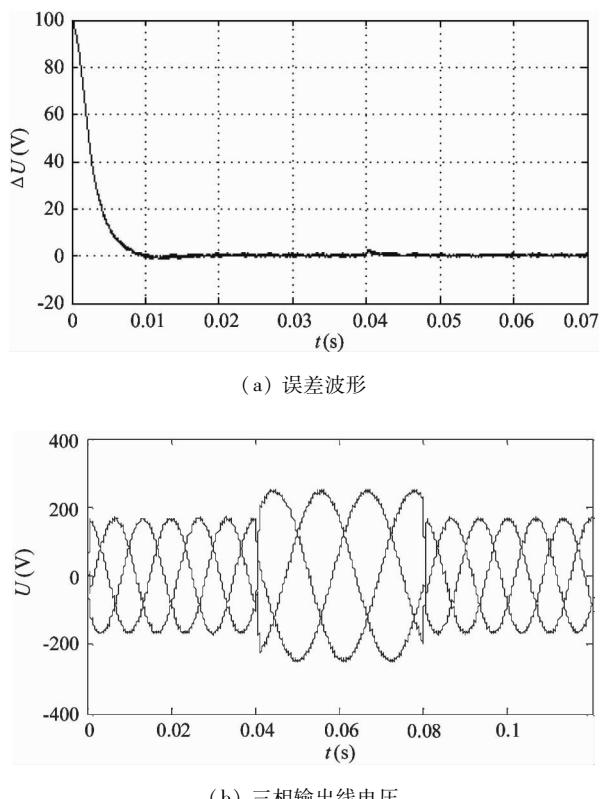


图 7 频率与幅值变化时的输出线电压仿真波形

(1) 负载不变,而参考信号发生变化的情况。这里取参考信号在 0.04s 时由 100V/50Hz 突变至 150V/30Hz,在 0.08s 参考信号又重新回到 100V/50Hz。图 7 给出了参考电压突变时,基于专家调节增益的神经元 PID 闭环控制系统仿真波形。

(2) 参考信号不变,而负载变化的情况。这里取参考信号为 100V/50Hz,在 0.04s 时负载由  $50\Omega$  突变至空载,在 0.08s 负载又重新变回  $50\Omega$ 。图 8 为负载突变时,基于专家调节增益的神经元 PID 闭环控制系统仿真波形。

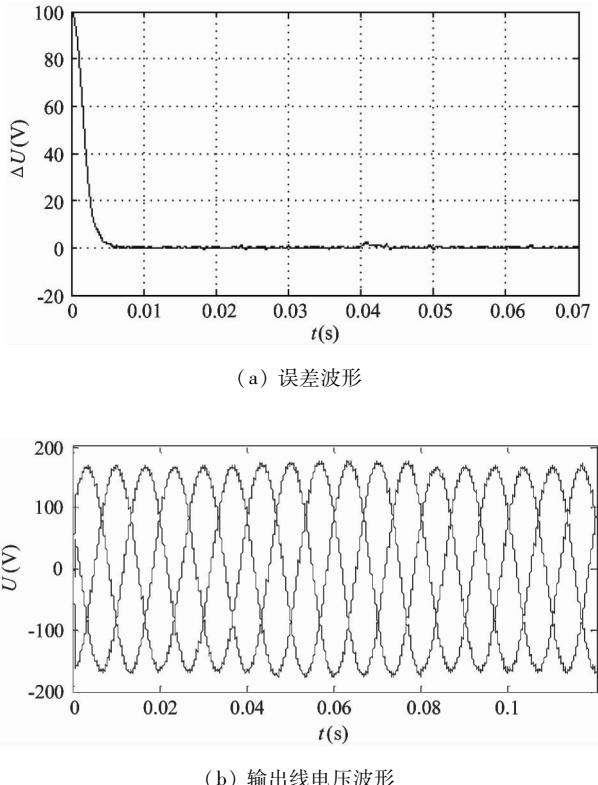


图 8 负载变化时的仿真波形

由表 1 及仿真波形可见:

(1) BBMC 实现了输出电压幅值和频率的任意调节,且输出电压的幅值和频率能够准确地跟踪参考值的变化,说明系统稳定可靠。

(2) BBMC 可直接输出高品质的三相对称正弦波而无需滤波环节,波形失真度小,总谐波畸变率(THD)均小于 5%。

(3) 从动态仿真研究可以看出,系统在运行过程中,如果参考信号发生变化,系统可迅速进入新的稳态,过渡过程很短;当负载发生变化时,输出电压几乎不受影响,可见系统具有良好的动态性能。

## 5 结 论

本文将基于专家调节增益的神经元 PID 控制器引入 Buck-Boost 矩阵变换器闭环控制系统。详细介绍了基于专家调节增益的神经元 PID 控制器原理及设计过程,建立了该控制系统的仿真模型。仿真研究结果表明:基于神经元 PID 控制的 Buck-Boost 矩阵变换器闭环控制系统能更好地抑制由电网电压突变或负载突变引起的扰动,且稳态性能和动态性能均较好,鲁棒性强,具有一定的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 张华强,王立国,徐殿国等. 矩阵式电力变换器的控制策略综述. 电机与控制学报, 2004, 8(3): 237-241
- [2] 张小平,尹翔,刘士亚. 基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速控制策略. 高技术通讯, 2014, 24(8): 842-846
- [3] 宗升,何湘宁,吴建德等. 基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4559-4570
- [4] 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): 1-6
- [5] 岳舟. 基于双闭环控制的光伏发电用 Cuk 逆变器研究. 高技术通讯, 2015, 25(4): 423-428
- [6] 肖冰,王印松,杨光军. 一种基于专家调节增益的单神经元 PID 控制. 自动化技术与应用, 2003, 22(4): 14-16
- [7] Han H G, Qiao J F, Chen Q L, et al. Model predictive control of dissolved oxygen concentration based on a self-organizing RBF neural network. Control engineering practice, 2012, 20(4): 465-476
- [8] Zan X S, Chao H. A novel adaptive controller in switched reluctance generator system. International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 2012, 4(3/4): 166-176
- [9] 曾琳,张文涛. 基于 RBF 神经网络的智能 PID 控制算法. 计算机与数字工程, 2011, 39(1): 17-20
- [10] 潘月斗,郭凯,陈继义等. 基于状态反馈线性化的矩阵变换器非线性控制. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 77-82
- [11] 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): 1-6
- [12] 陈杰,陈办,陈家伟等. 变速风力发电机组的模糊-单神经元 PID 控制. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 88-94
- [13] 吴卫香,干. 聪. 不确定机器人的自适应神经网络控制与学习. 控制理论与应用, 2013, 30(8): 990-997
- [14] 张昭昭,乔俊飞. 基于在线减法聚类的 RBF 神经网络结构设计. 控制与决策, 2012, 27(7): 997-1002
- [15] 张刚林,甘敏,董宁平等. 全局优化 RBF 网络的一种新算法. 控制工程, 2012, 19(3): 459-461
- [16] 岳舟. 基于滑模控制的 Cuk 光伏逆变器研究. 高技术通讯, 2014, 24(8): 852-857

# Research of Buck-Boost matrix converter based on neuron PID control

Yue Zhou

(Department of Energy and Electrical Mechanical Engineering, Hunan University of Humanities  
and Science and Technology, Loudi 417001)

## Abstract

The topological structure and working principle of matrix converters were studied, and the neuron PID (proportional-integral-differential) control mechanism and its learning algorithm were analyzed. Then, a new type of Buck-Boost-matrix converter (BBMC) with excellent electrical characteristics was designed and implemented by applying a neuron PID control strategy based on expert's gain control to BBMC's double closed loop control system. The control effect of the new BBMC was verified by the simulation using the software of MATLAB. The simulation results show that, when the BBMC's input voltage changes suddenly, the neuron PID can effectively adjust the PID parameters to make the output voltage follow the change of the input voltage effectively to quickly reach a steady state, presenting its better dynamic performance and robustness application value.

**Key words:** neuron PID, Buck-Boost matrix converter (BBMC), expert gain control, double loop control