

DC/DC 变换器神经网络控制策略的研究

欧阳慧林, 王钢, 丁茂生

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 神经网络控制是一种性能卓越的控制策略,神经网络具有出色的知识抽取与学习能力及较强的控制鲁棒性。将神经网络控制策略引入 DC/DC 变换器,基于 BP 神经网络,构造了一种 DC/DC 变换器的新型控制方法。以 Buck 变换器为例,为其设计了神经网络控制器,对其性能进行了仿真研究,并与传统的 PI 调节器的性能进行了比较。仿真结果表明,在输入电压或负载有快速波动的情况下,神经网络控制系统比 PI 调节器具有更好的动态响应特性。

关键词: DC/DC 变换器; BP 神经网络; 控制器

中图分类号: TP13; TP183

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)16-0016-04

0 引言

DC/DC 变换器通常采用 PWM 控制以实现输出电压的稳定。PWM 控制系统在本质上是离散非线性系统,难以构造精确的传递函数。目前实际应用中最为广泛的控制策略是 PI 控制,其网络参数的选取必须基于被控对象的精确模型,在实际应用中其参数往往通过试探法反复调整才能确定。而电路参数一旦确定,PI 控制器参数也就确定下来,因而系统只能对一定范围内的扰动表现出良好的控制性能。

BP(Back Propagation)神经网络具有良好的自学习功能,因而在处理控制系统的非线性、不确定性问题上有其独特的优势。目前神经网络控制方法在电力电子领域的研究已经取得了一定的成果,文献[1]将神经网络控制应用于 UPS,改善其暂态响应和对不同负载的适应性,使输出电压谐波含量降低,动态响应性能得到改善。文献[2]设计了基于 BP 神经网络的滞环电流内环控制,实现了神经网络对快速变量的控制,提高了滞环控制的性能,使系统对参数的变化不敏感、有较强鲁棒性。BP 神经网络结构简单,通过学习可以逼近任意非线性函数,目前已有稳定快速的算法保证网络的收敛,使得神经网络用于实际控制成为可能。

DC/DC 变换器电路形式多种多样,并处在不断发展中,这就要求控制系统具有较宽的适用性。同时控制系统必须能精确、快速反应,能根据输入电压和负载的变化自适应调整控制器,才能保证系统具有良好的动态响应性能。因此,本文将 BP 神经网络引入 DC/DC 变换器控制。其优点是不需对变换

器进行精确建模,而且即使在电路参数和负载发生较大变化的情况下,也不必对控制器进行重新设计。

1 基于 BP 神经网络控制器的设计

1.1 控制器的结构

神经网络控制器探测到 DC/DC 变换器所受的扰动时,应能预测到输出的相应变化,给出具有合适占空比的控制信号,以稳定输出电压。基于神经网络控制器的 DC/DC 变换器系统如图 1 所示。神经网络控制器的结构如图 2 所示。神经网络控制器的输出为 PWM 波形,可对 DC/DC 变换器进行直接控制。

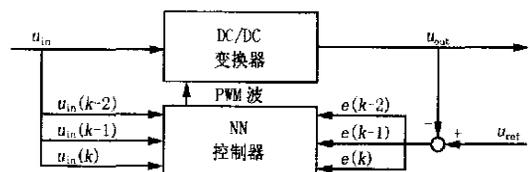


图 1 基于神经网络控制的 DC/DC 变换器

Fig. 1 DC/DC converter with NN controller

一般来说,神经网络反馈控制器可由下式描述:

$$d(k+1) = h \begin{bmatrix} u_{in}(k), u_{in}(k-1), \dots, u_{in}(k-m) \\ e(k-1), \dots, e(k-n), d(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $e(k-n) = u_{out}(k-n) - u_{ref}$; u_{ref} 为输出的参考电压,为一常数; $u_{out}(k)$ 为输出的实际电压; $u_{in}(k)$ 为输入电压; $d(k)$, $d(k+1)$ 分别为第 k 时刻和第 $k+1$ 时刻控制信号的占空比; m , n 为阶次。

BP 网络可以映射任意非线性函数,并具有自适应学习、并行分布处理及较强的鲁棒性和容错性等特点,因此适用于非线性系统的控制。本文采用含

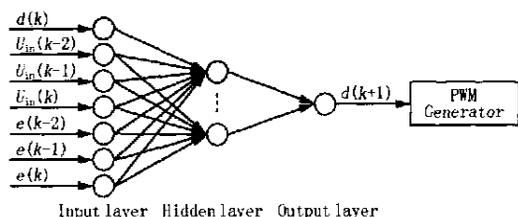


图2 BP神经网络控制器

Fig.2 BP neural network controller

输入层(Input Layer)、隐含层(Hidden Layer)和输出层(Output Layer)三层结构的BP网络设计控制器,如图2所示。系统下一时刻控制量的给出与系统当前状态、前一时刻的状态以及系统前一时刻状态的变化量紧密相关,故 m, n 均取 2,则该神经网络输入层结点数为 7,隐含层结点为 16,输出层结点为 1。

$$c_{11}(k) = d(k), c_{12}(k) = u_{in}(k-2)$$

$$\text{输入层: } \begin{aligned} c_{13}(k) &= u_{in}(k-1), c_{14}(k) = u_{in}(k) \\ c_{15}(k) &= e(k-2), c_{16}(k) = e(k-1) \end{aligned} \quad (2)$$

$$c_{17}(k) = e(k)$$

$$\text{隐含层: } s_{2i}(k) = \sum_{j=1}^{n_1} 2_{ij}c_{1j}(k) + 2_i \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_2; j = 1, 2, \dots, n_1$$

$$c_{2j}(k) = v[s_{2i}(k)] \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_2$$

$$\text{输出层: } s_3(k) = \sum_{j=1}^{n_2} 3_j c_{2j}(k) + 3 \quad (5)$$

$$d(k+1) = v[s_3(k)] \quad (6)$$

在上述式子中,各变量的第一个下标 1、2 和 3 分别表示输入层、隐含层和输出层; n_1 为输入层结点数, n_2 为隐含层结点数; $c_{1j}(k), c_{2j}(k)$ 分别表示输入层、隐含层的第 j 个结点的输出; 2_{ij} 为输入层与隐含层之间的连接权系数, 3_j 为隐含层与输出层之间的连接权系数; 2_i 为隐含层结点的阈值, 3 为输出层结点的阈值; $s_{2i}(k)$ 为隐含层第 i 个结点的输出值, $s_3(k)$ 为输出层结点的输出值; v 是神经元激励函数中的 S 型函数。

1.2 控制器的实现

1.2.1 样本集的建立

BP 模型属于有导师学习模型,因此,训练样本集中每一个样本都要包括 7 个输入变量和 1 个输出变量的实际值,测试样本集中的每一个样本只有 7 个输入变量。选用图 3 所示的 buck 电路作为研究对象,对基于 BP 神经网络控制器的实现方法进行研究。

利用 Matlab 对 DC/DC 变换器在输入电压和负载波动的情况下,对稳压的输出情况进行仿真计算,建立训练和测试样本。由 BP 神经网络的神经元的处理函数可以看出,BP 神经网络的神经元结点的输出值的取值范围为 $[0, 1]$,当神经元结点输入的绝对值太大时,会导致神经元结点饱和。因此,在采用 BP 网络映射函数关系时,其输入值应在 $[-1, 1]$ 内。这样,还必须先对 Matlab 的仿真结果得到的数据进行预处理,使神经网络各输入值满足上述要求。

1.2.2 网络的训练

对网络进行训练应尽可能地包括分析问题所必须的各种信息,这就要求有大量的训练样本。而引起 DC/DC 变换器输出电压波动的主要原因是输入电压波动和负载变化。因此,用于 Buck 电路的神经网络控制器学习所用的训练样本包括以下三类:(1) 输入电压波动时,维持输出电压稳定的样本;(2) 负载变化时,维持输出电压稳定的样本;(3) 输入电压和输出负载同时变化时,维持输出电压稳定的样本;而(3)类样本形成时包含(1)、(2)类样本。形成方法如下:输入电压 $(1-a)U_{in-ref}$, a 分别为 $\{-0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$;负载 R_{load} 在 $[5, 235]$ 的范围内变化,变化的步长为 10;输入电压在变化范围内每取定一值,负载的取值在变化范围内遍历;或者负载在变化范围内每取定一值,输入电压的取值在变化范围内遍历,这样用于 BP 网络训练的样本数目总共为 216 组。利用训练样本集对所确定的 BP 网络进行训练,采用反向误差传播法则,确定学习率参数 $= 0.59$,动量参数 $= 0.35$ 。当网络的实际输出值与期望输出值之差小于误差目标值(0.001)时,则已达到精度要求,停止训练。

1.2.3 网络的测试

为了检验 BP 网络性能,要对训练好的人工神经网络进行测试。首先要形成测试样本集,测试的样本应当区别于训练的样本。测试样本集的形成方法与训练样本集相同,在形成测试样本时,按如下方法获得测试样本:输入电压 $(1-a) \cdot U_{in-ref}$,取 a 分别为 $\{-0.35, -0.25, -0.15, -0.05, 0.05, 0.15, 0.25, 0.35\}$;负载 R_{load} 在 $[10, 240]$ 的范围内变化,变化的步长为 10;输入电压在变化范围内每取定一值,负载的取值在变化范围内遍历,或者负载在变化范围内每取定一值,输入电压的取值在变化范围内遍历,这样用于 BP 网络测试的样本数目总共为 192 组。如果用该测试样本集对训练好的神经网络进行测试时,网络的输出均满足精度要求,

则可认为该神经网络可用于控制了。

1.2.4 控制器工作流程

用于调节 DC/DC 变换器的神经网络控制器的实现流程如下:

- 1) 对神经网络控制器进行初始化,对神经网络各结点间的连接权系数和各结点阈值赋初始值。
- 2) 利用 Matlab 按照 1.2.2 中训练样本的形成方法,改变输入电压和负载,采样得到 $u_{in}(k), u_{in}(k-1), u_{in}(k-2), u_{out}(k), u_{out}(k-1), u_{out}(k-2), u_{ref}$, 在 $d(k)$ 的取值范围内搜索使电压稳定的值 $d(k)$, 然后预处理以满足神经网络对输入的要求。
- 3) 将 216 组训练样本输入神经网络,供其学习,直到神经网络在每一组样本输入后,使输出 $d(k+1)$ 都能逼近样本中给定的 $d(k+1)$, 满足精度要求;若训练不收敛,则可通过调整 BP 神经网络的隐含层结点个数,或者调整神经网络各结点间的连接权系数和各结点阈值的初始值,或者调整学习步长等办法使其收敛。
- 4) 用 192 组测试样本测试神经网络;精度不满足要求,则重新训练神经网络直至测试神经网络时输出满足精度要求。
- 5) 将测试好的神经网络用于控制,控制器直接输出 PWM 波,以保证扰动发生时输出电压维持稳定。

2 仿真结果

本文对典型的 Buck 型 DC/DC 变换器的电路可能遇到的扰动进行模拟,用模拟的结果对控制器进行训练。训练好的神经网络控制器经过测试后用于控制,研究了神经网络控制器在输入电压和负载快速波动时,被控电路所表现出来的动态响应性能;并与传统的 PI 控制进行性能比较。电路的拓扑结构如图 3 所示。

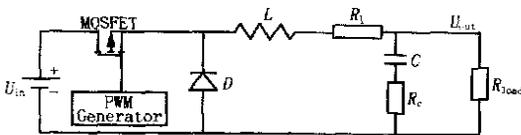


图 3 Buck 电路拓扑

Fig. 3 Topology of Buck circuit

参数如下:输入电压: $u_{in} = 30\text{ V}$;输出电压: $U_{out} = 13.5\text{ V}$;开关频率: $f = 100\text{ kHz}$;元件参数: $C = 22\text{ }\mu\text{F}$, $R_c = 0.20$, $L = 900\text{ }\mu\text{H}$, $R_1 = 0.25$, $R_{load} = 20$ 。

设计如图 4 所示 PI 控制器与神经网络控制器

进行性能比较。参数如下: $R_1 = R_2 = 6\text{ k}$, $C_1 = 400\text{ nF}$, $R_3 = 60\text{ k}$, $V_{ref} = 7\text{ V}$;三角波 $V_{tri}: V_u = 8.2\text{ V}, V_l = 2.8\text{ V}$, 频率 $f = 15\text{ kHz}$ 。 V_{ref} 为输出电压的额定值, V_u 为三角波的峰值电平, V_l 为三角波的谷值电平。

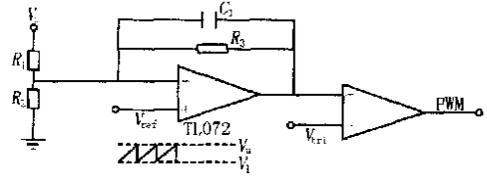


图 4 PI 控制器

Fig. 4 PI controller

图 5 为输入电压由 30 V 变化为 50 V 时,在 PI 控制和 BP 神经网络控制下 DC/DC 变换器的输出电压响应。图 6 为负载从 20 阶跃上升为 120, 然后从 120 阶跃下降为 20 时,两种控制方式下的输出电压响应图。

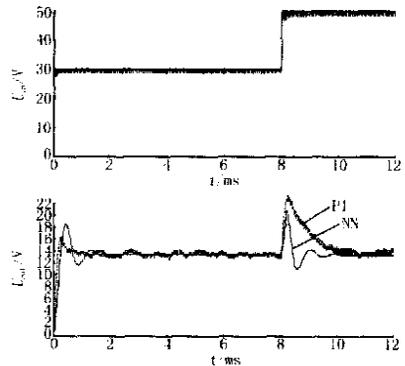


图 5 输入电压变化时的响应图

Fig. 5 Response to step change of input voltage

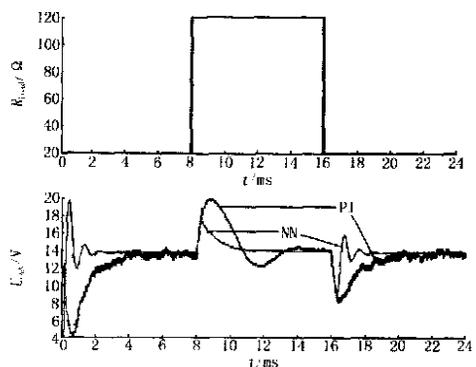


图 6 负载变化时的响应图

Fig. 6 Response to the changes of load

由仿真结果可以看出,在电压和负载出现快速波动时,与基于 PI 控制的系统的性能相比较,基于神经网络控制的系统的超调量比基于 PI 控制的超调量明显小,且过渡时间短,系统稳定后的电压纹波

小。

3 结论

本文将 BP 神经网络与 PWM 控制结合,为 Buck 型的 DC/DC 变换器设计了控制器,研究了具有神经网络控制器的系统在输入电压和负载快速波动情况下的动态响应性能。仿真结果表明神经网络控制器具有出色的知识抽取和学习能力,使控制具有较强的鲁棒性。与传统的 PI 控制相比较,系统具有更好的动态响应性能,更强的抗干扰能力。且随着神经网络处理器运算速度的提高和算法的改进,神经网络控制器的性能将有望得到进一步提高。

参考文献:

[1] SUN Xiao, XU De-hong, et al. Neural-network-controlled Single-phase UPS Inverters with Improved Transient Response and Adaptability to Various Loads, Power Electronics and Drive Systems [A]. Proceedings of the IEEE International Conference. (PEDS 99) 1999. 2 :865-870.

[2] 孙孝峰, 邬伟扬, 等 (SUN Xiaofeng, WU Weiyang, et al). 三相交流器神经网络滞环控制研究 (A Research on Neur-

ral Network Hysteresis Controller of Three Phase Converter) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(10) :39-43.

[3] Psaltis D, Yamamura. A Multilayered Neural Controller[J]. IEEE Control System, 1988, 8(2) : 17-21.

[4] Saeren M, Soquet. A Neural Controller[C]. 1st IEE International Conference on Artificial Neural Networks, 1989. 211-215.

[5] Hecht-Nielsen R. Theory of the Back Propagation Neural Network[A]. IJCNN, '89. 1 :593-606.

[6] 张乃尧, 阎平凡 (ZHANG Nai-yao, YAN Ping-fan). 神经网络与模糊控制 (Neural Network and Fuzzy Control) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing:Tsinghua University Press), 1998.

收稿日期: 2003-12-08; 修回日期: 2004-02-10

作者简介:

欧阳慧林 (1979 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统数字控制; E-mail: oyhl-521@sina.com

王 钢 (1966 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、电力电子;

丁茂生 (1977 -), 男, 博士研究生, 目前从事电力系统继电保护、电力电子设备的可靠性研究。

Study of neural network control method in DC/DC converter

OUYANG Hui-lin, WANG Gang, DING Mao-sheng

(School of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The neural network control method is a novel type of control strategy. It has outstanding advantages in knowledge extracting and learning, and strong robustness in control. This paper is mainly to study the feasibility of introducing the neural network technique into the control of DC/DC converters. A new control strategy based on the BP neural network for DC/DC converter is proposed, and a neural network controller for the Buck type DC/DC converter is designed. The simulation results indicate that in the situation of input voltage and load with quick fluctuations, compared with the DC/DC converter which is based on the traditional PI control, the one based on the neural network control has a much better dynamic response characteristic.

Key words: DC/DC converter; BP neural network; controller

许继集团公司入选“河南省工业综合实力百强企业”

2003 年度“河南省工业综合实力 100 强企业”和“河南省非公有制工业综合实力 100 强企业”座次日前排出,省统计局、省工业经济联合会和河南日报报业集团联合发布了“双百强”企业名单。许继集团有限公司位居“河南省工业综合实力 100 强企业”第 13 位。

据悉,“双百强”评定主要依据全省 2003 年度工业企业统计资料,从中选取能够综合体现企业规模和整体效益情况的指标,加以认真分析和评价后排出的。