

# 电动汽车用 DC/DC 变换器模糊自整定 PI 控制

王宝瑛, 朱方明, 曹秉刚, 白志峰

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 以提高电动汽车控制性能为目标, 对电动汽车控制系统的双向 DC/DC 变换器和电机驱动器的基本组成电路——降压斩波电路和升压斩波电路进行了研究, 搭建了 DC/DC 变换器实验台, 设计了模糊自整定 PI 控制器, 并通过实验验证了该控制器的良好控制效果。

关键词: 变换器; 模糊控制; 电动车辆 / 自整定

中图分类号: TM46 U469.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2007)01-0048-03

## Study on Fuzzy Self-Tuning PI Control for DC/DC Converter of Electric Vehicle

WANG Bao-ying, ZHU Fang-ming, CAO Bing-gang, BAI Zhi-feng

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the control performance of electric vehicle, the Buck chopper and Boost chopper which are the basic circuits of bi-directional DC/DC converter and motor driver in the control system of electric vehicle are studied in this thesis. The test bed of DC/DC converter is constructed and the fuzzy self-tuning PI controller is designed. Experiment verified the controller is wonderful in the control effect.

Keywords: converter; fuzzy control; electric vehicle / self-tuning

## 1 引言

当今世界环境污染日益严重, 石油资源危机亦已迫在眉睫。汽车作为引起这两方面问题的主要因素已引起人们广泛关注。电动汽车以其无污染、噪声低、能源效率高且多样化、结构简单、使用维修方便成为汽车工业推出的新型交通工具<sup>[1]</sup>。但由于动力电源使用成本高且续航里程短, 严重阻碍了电动汽车的商品化, 电池性能不佳也是电动汽车难以普及的关键因素。再生制动技术在一定程度上可解决续航里程短的问题, 并且可节约能源, 降低成本。在电动汽车驱动及再生制动系统中, 双向 DC/DC 变换器和电机驱动器作为能量流动的重要环节, 其基本组成电路——降压斩波电路和升压斩波电路的研究, 对充分发挥电动汽车的性能有着重要的意义。

## 2 DC/DC 变换器在电动汽车中应用

图 1 给出电动汽车驱动及再生制动系统功能示意图。主电源是蓄电池, 输出功率与电动汽车平均行驶功率需求相当; 辅助电源是超级电容或超高速飞轮, 输出功率高于平均功率需求, 并可以吸收再生能量。系统工作原理为: 在车辆启动和加速时, 要求电机转矩增大, 辅助电源通过双向 DC/DC 变换器和蓄电池并联, 同时向电机提供能量; 在车辆正常行驶时, 蓄电池通过电机驱动器向电机提供能量; 在车辆

减速或制动时, 电机工作于发电机工况, 再生制动回馈的能量经过双向 DC/DC 变换器向辅助电源充电, 若辅助电源已充满电, 则再生制动回馈的能量经过电机驱动器向蓄电池充电。

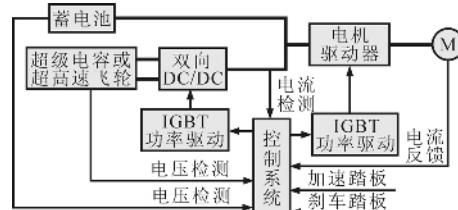


图 1 电动汽车驱动及再生制动系统功能示意图

电动汽车中主要采用双向 DC/DC 变换器和电机驱动器。双向 DC/DC 变换器控制蓄电池与辅助电源之间的功率分配, 并在车辆低功率行驶时, 限制蓄电池对辅助电源的充电率。电机驱动器根据直流电机、交流电机的不同可以是 DC/DC 变换器或 DC/AC 变换器。分析电动汽车驱动及再生制动过程可知, 在不同的电机工况下, 双向 DC/DC 变换器和电机驱动器可简化为一个降压斩波电路或升压斩波电路。

## 3 DC/DC 变换器实验台设计

图 2 示出搭建的实验台主电路, 功率开关管  $VT_1 \sim VT_4$  组成桥的 4 个臂。实验台用软件完成控制调节, 输出 PWM 信号驱动主电路 4 个 IGBT, 通过控制占空比的改变实现电压的升降。表 1 给出实验台主电路工作状态。

实验台的控制电路包括控制板和驱动板。图 3 示出实验台控制板硬件结构示意图。控制板采用

定稿日期: 2006-06-05

作者简介: 王宝瑛(1976-), 女, 河北人, 工程师, 硕士生, 研究方向为电力电子技术。

TMS320LF2407DSP 芯片作为系统的控制器,完成信号采样、数据处理及输出控制与监测等功能<sup>[2]</sup>。控制电路包括 DSP 外围电路、故障信号处理电路、PWM 输出隔离电路、信号调理电路。采样信号包括蓄电池电压、变换器输出电压、电感电流、升降压指令共计 4 路信号。4 路 PWM 控制信号控制 4 个 IGBT,并采用 4 个发光二极管实现显示故障信号的报警功能。电压反馈信号经隔离放大送给 DSP 内 ADC 构成电压闭环。

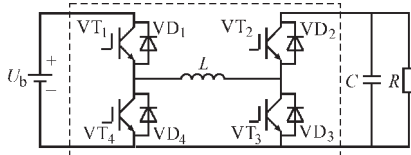


图 2 DC/DC 变换器实验台主电路

图中  $U_b$  蓄电池 R 负载电阻  
L 储能电感 C 滤波电容

表 1 DC/DC 变换器实验台主电路工作状态

开关管	VT <sub>1</sub>	VT <sub>2</sub>	VT <sub>3</sub>	VT <sub>4</sub>
正向升压	导通	截止	斩波	截止
正向降压	斩波	截止	截止	截止
反向升压	截止	导通	截止	斩波
反向降压	截止	斩波	截止	截止

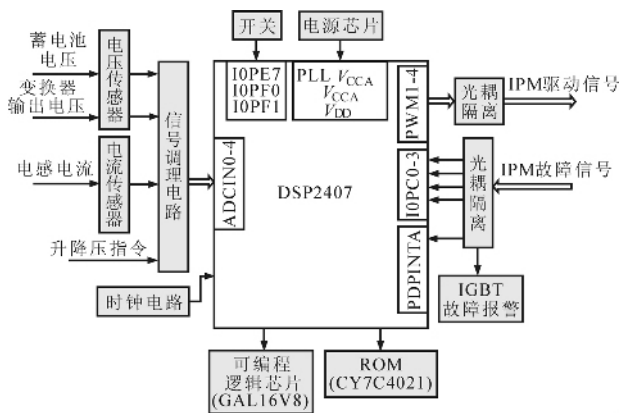


图 3 实验台控制板硬件结构示意图

## 4 模糊自整定 PI 控制器的设计

### 4.1 模糊自整定 PI 控制原理

在系统参数变化及非线性情况下,传统 PID 控制很难保持设计时的性能指标,而模糊控制器不需要对象精确的数学模型,在一定程度上克服了系统变参数及非线性等不利因素,其动态响应具有较快的收敛性,但稳态时系统会出现震颤现象<sup>[3]</sup>。本文将 PI 控制和模糊控制有机地结合起来,构成模糊自整

定 PI 控制器。利用模糊技术对  $K_p, K_i$  进行在线调整,以满足不同工况下对控制器参数的不同  $e$  要求,这样既能改善模糊控制器的稳态性能,又能在一定程度上提高 PI 控制器的自适应性。

图 4 示出模糊自整定 PI 控制器原理。模糊控制器的输入语言变量为电压误差  $e$  和电压误差变化率  $de/dt$ , 输出语言变量为 PI 控制器的两个参数  $K_p, K_i$  的变化量  $\Delta K_p, \Delta K_i$ 。

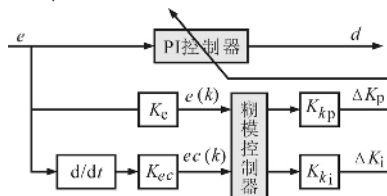


图 4 模糊自整定 PI 控制器原理图

### 4.2 确定模糊语言变量及其隶属函数

设  $E, EC, K_p, K_i$  的模糊子集均为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 各语言变量的论域分别为  $E, EC = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ,  $K_p = \{-1, -0.66, -0.33, 0, 0.33, 0.66, 1\}$ ,  $K_i = \{-0.1, -0.066, -0.033, 0, 0.033, 0.066, 0.1\}$ 。除各语言变量的模糊子集 NB 采用 Z 型隶属函数、PB 采用 S 型隶属函数外,其它选用连续型三角形隶属函数。

### 4.3 确定量化因子和比例因子

在模糊控制中,采用固定的一组量化因子和比例因子难以达到预期的控制效果。本文采用两组量化因子和比例因子调整控制的不同阶段。

(1) 量化因子: 当  $e > 2$  时  $K_e = 0.5, K_{ec} = 0.0001$ ; 当  $e \leq 2$  时  $K_e = 0.2, K_{ec} = 0.001$ 。

(2) 比例因子: 当  $e > 2$  时  $K_{kp} = K_{ki} = 0.0015$ ; 当  $e \leq 2$  时  $K_{kp} = 0.0003, K_{ki} = 0.0001$ 。

### 4.4 建立 PI 参数模糊自整定的规则

通过对系统的分析结合专家经验和反复试验,构造出  $K_p, K_i$  模糊控制规则,如表 2、表 3 所示。

表 2  $K_p$  的模糊控制规则

$\Delta K_p$	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	PS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	PS	PS
ZO	PS	PS	PS	ZO	PS	PS	PS
PS	PS	PS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	PS	PS	PM	PM	PM	PM	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

表 3  $K_i$  的模糊控制规则

EC E		EC							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
E	$\Delta K_i$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
		NB	NS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM
		NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
		NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
		ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
		PS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
		PM	PM	PM	PM	PB	PB	PB	PB
	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	

### 4.5 模糊合成推理、解模糊和确定 PI 控制器参数

根据模糊理论进行算法合成可求出相应的  $K_p$  和  $K_i$ 。然后采用重心法解模糊 根据参数调整算式确定 PI 控制器参数。参数预整定采用 Ziegler-Nichols 方法求解  $K_p$   $K_i$  的初始值  $K_p^0$   $K_i^0$  :

$$\begin{cases} K_p = K_p^0 + \{E, EC\} K_p = K_p^0 + K_p \\ K_i = K_i^0 + \{E, EC\} K_i = K_i^0 + K_i \end{cases} \quad (1)$$

## 5 实验

通过 PI 控制和模糊自整定 PI 控制对比了两种控制方法的控制效果。模糊自整定 PI 控制器实验参数初始值与 PI 控制器参数相同。图 5 为实验波形。

图 5a b 为输入电压  $u_{in}$  由 60V 发生约 30% 跳变过程的升压变换实验结果。负载电阻为 40  $\Omega$  控制输出电压  $u_o=120V$  , PI 控制器参数  $K_p=K_i=0.001$ 。实验结果表明 ,当输入电压变化时 ,模糊自整定 PI 控制的调节时间和超调量均明显优于 PI 控制 ,其输出电压波动变化小 ,稳定性好。图 5c d 为负载电阻调整为 20  $\Omega$  后输入电压由 60V 发生约 30% 跳变过程的升压变换实验结果。控制  $u_o=120V$   $K_p=K_i=0.001$ 。实验结果表明 ,当调整负载电阻后  $u_{in}$  变化时 ,模糊自整定 PI 控制的调节时间和超调量均明显优于 PI 控制。图 5e f 为负载电阻由 40~20  $\Omega$  之间多次跳变的降压变换实验结果。设定  $u_{in}=120V$  ,控制  $u_o=60V$   $K_p=0.001$   $K_i=0.0003$ 。实验结果表明 ,当负载电阻跳变时 ,模糊自整定 PI 控制的输出电压  $u_o$  波

形更加平整 ,鲁棒性和自适应性好于 PI 控制。

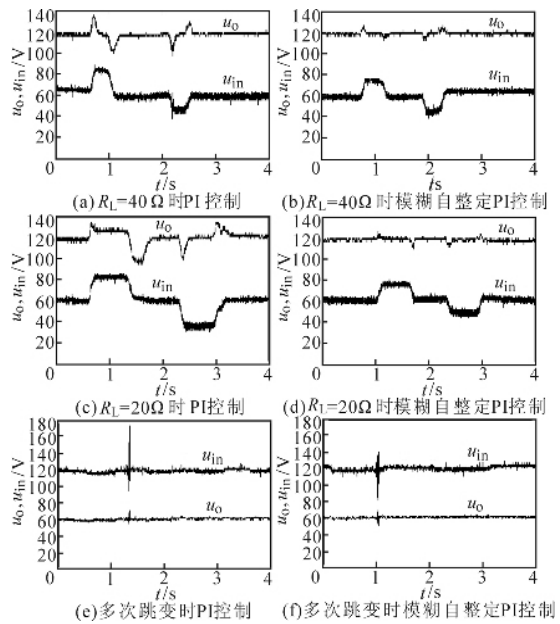


图 5 实验参数

## 6 结论

针对电动汽车驱动及再生制动系统中双向 DC/DC 变换器及电机驱动器的基本组成电路——降压斩波电路和升压斩波电路进行了研究 ,搭建了双向 DC/DC 变换器实验台 ,设计了模糊自整定 PI 控制器。实验结果表明 ,当控制对象工作点发生变化时 ,模糊自整定 PI 控制比 PI 控制的控制效果好 ,主要体现在调节时间短 ,超调量小 ,控制精度高 ,稳定性好等方面。说明模糊控制规则发挥了对 PI 参数的在线调整功能 ,可满足不同工况下对控制器参数的不同要求 ,提高了控制器的自适应性 ,使 DC/DC 变换器的输出电压具有良好的动态和静态性能。

### 参考文献

- [1] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] 刘和平, 严利平, 张学锋, 等. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [3] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

## “电力电子电磁兼容技术”专辑征文启事

随着信息、通信、微电子、电力电子及电力传动技术在国民经济(包括国防)各部门的广泛应用,电力电子装置(系统)对电磁环境造成的污染和因之对其周边其它电子设备造成的干扰,已经引起国内外研究开发和工程技术人员的密切关注。欧洲共同体国家已经根据 89/336/EEC 电磁兼容指令,开始对进入欧

洲的大多数电工、电子产品强制执行 EMC 论证,我国也相应地从 2003 年 5 月 1 日起对部分产品强制执行 3C China Compulsory Certification) 论证,其中包括了部分 EMC 论证的内容。

可以预见,随着我国工业、国防现代化进程的加速和高技术电子产品(设备)更广泛的应用,对电力电子及电力传动

装置进行强制 EMC 论证是势在必行的事,而电力电子及电力传动技术对社会经济可持续发展具有重大的技术经济效益也是不争的事实,所以电力电子电磁兼容技术关系到电力电子及电力传动的发展,对提高经济增长质量和效益,减少电磁环境污染,保障国民经济持续、快速、健康发展具有重要(下转第 66 页)