

基于模糊PI控制的电动汽车双向DC/DC变换器

丁惜瀛, 于 华, 李 健, 张钦爽

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 电动汽车直流动力源的特殊性和对驱动性能的高品质要求决定车用DC/DC变换器要有稳定的电压、电流输出。针对DC/DC变换器在车辆行驶状态切换过程中呈现的严重非线性问题, 提出了电流环沿用传统PI控制, 电压环采用模糊PI控制的双闭环斩波控制方案; 在分析双向DC/DC变换器工作原理的基础上, 根据变换器自身的变结构特性, 设计了模糊PI控制器。仿真结果表明, 本控制方案可有效提高变换器的鲁棒性, 减小输出电压波动。

关键词: 电动汽车; 功率变换; 非线性控制; 双向DC/DC变换器; 模糊PI控制

中图分类号: TM46; U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2012)01-0013-04

The Electric Vehicle Bi-directional DC/DC Converter Base on Fuzzy PI Control

DING Xi-ying, YU Hua, LI Jian, ZHANG Qin-shuang

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

Abstract: The particularity of electric vehicles DC power source and high quality requirement determine that DC/DC converter requires stable voltage and current output. To solve the serious nonlinear problem in process of vehicle's status switching, chop-control is adopted which is composed by conventional PI control in current loop and fuzzy PI control voltage loop. In the analysis of bi-directional DC/DC converter working principle, the fuzzy PI controller is designed based on the change of its own structural characteristics of the converter. The simulation results show that the control scheme effectively improves the robustness of the converter and reduces the output voltage fluctuations.

Key words: electric vehicle; power convert; nonlinear control; bi-directional DC/DC converter; fuzzy PI control

0 引言

近年来,双向DC/DC变换器以其优良的特性在数控机床、地铁、电力机车等领域得到了广泛的应用。电动汽车的能量源为串联的电池,串联电池数量与高压电机的矛盾及对制动能量回收的考虑,使双向DC/DC变换器在电动汽车上必不可少,而双向DC/DC变换器是影响电动汽车性能的重要因素。

车用双向DC/DC变换器的非线性和时变性都比较严重,其产生的主要原因有:(1)电感、电容的存在,使DC/DC变换器特性在车辆载荷变化及起动、制动、加速

和减速等不同工况下呈严重非线性;(2)开关器件一个周期内既工作在饱和区又工作在截止区,系统呈分段线性、时变的特点;(3)开关器件切换改变了系统的拓扑结构,使系统呈变结构特性。显然,采用传统的PI控制很难获得理想的控制效果,为了提高系统的性能,需要寻求一种新的非线性控制方法。

随着现代控制理论的发展,非线性控制在电力电子变换器的控制中得到了广泛应用,如反馈线性化、滑模控制、无源性控制、神经网络、智能控制、模糊控制等。文献[1]分析了DC/DC变换器与传统逆变器的非线性特点,提出分别应用反馈线性化控制和高阶滑模控制两种方法的新型直流变换器逆变器,解决DC/DC变换器和传统的逆变器的非线性问题。文献[2]针对DC/DC变换器存

收稿日期: 2011-09-02

作者简介: 丁惜瀛(1964-),女,教授,博士,研究方向为电动汽车牵引及安全性控制。

在的非线性问题,分别应用滑模变结构控制器和Backstepping滑模控制器进行控制,结论是滑模变结构控制系统动态性能较好,但抖振现象严重,Backstepping滑模控制动态响应慢,但具有很好的鲁棒性能。该文献在上述工作的基础上,结合两种滑模控制器的优点,设计出一种切换控制方法,在升压的不同状态下,进行控制器的切换,使系统同时具有良好的快速性和稳定性。文献[3]提出利用无源性控制和滑模控制解决DC/DC变换器的非线性问题。应用状态空间平均法建立了DC/DC变换器的解析数学模型,利用无源性控制和滑模控制相结合的复合控制方法来控制DC/DC变换器。这种改进型的无源性控制降低了单纯的无源性控制产生的过大静差,同时滑模控制的特点使系统更为简化,易于实现。

上述方法虽然能够很好地解决系统非线性问题,但或控制器设计过于复杂,或系统存在的高频抖振影响DC/DC变换器的稳态性能。本文利用模糊控制在解决非线性问题中的优势,综合线性PI控制的优点,提出用电压、电流双闭环的控制结构。电压环采用模糊PI控制,降压和升压时分别对电压环PI参数进行模糊自整定,根据电压变化及电压变化率不同范围来修正PI参数,使输出电压在调节过程中能够及时地跟随给定值;电流环采用传统PI控制,防止电感电流因系统结构的变化及负载突变而产生尖峰和纹波。

1 拓扑结构及工作原理

双向DC/DC变换器具有多种拓扑结构,其中Buck-boost双向DC/DC变换器具有结构简单、可靠性高,易实现电压的双向控制的特点,能满足电动汽车对能量变换装置的特殊要求^[4-6]。图1给出了Buck-boost双向DC/DC变换器的拓扑结构。

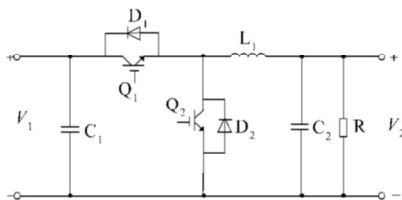


图1 双向DC/DC变换器电路结构图

Fig.1 Structured diagram of Bi-directional DC/DC converter

1.1 升压模式

当电动汽车处于电动状态,需要高电压启动或加速时,电池电压无法满足要求,DC/DC变换器需运行在升压模式。保持 Q_2 持续关断,当 Q_1 开通时,电感 L_1 迅速储能, C_2 作为电源为负载供电;当 Q_1 关断时,蓄电池侧

V_1 与储能电感 L_1 共同作用,为负载供电。在 Q_1 开通关断一个周期内,高压侧输出电压为:

$$V_2 = \frac{1}{(1-\alpha_1)} V_1 \quad (1)$$

α_1 为 Q_1 的占空比,通过调节占空比实现升压目的,满足电动汽车驱动要求。

1.2 降压模式

当汽车处于急停或下坡状态,能量需要回馈给电池时,考虑到电池充电的需要以及其无法承受瞬间大电流冲击的特性,DC/DC变换器需运行在电流受控的降压模式。保持 Q_1 关断,当 Q_2 开通时,电感 L_1 充电, C_1 向电池充电; Q_2 关断时,二极管续流,电感电压与 V_1 大小相同、极性相反, L_1 向电池充电。 Q_2 开通关断一个周期内,输出电压为:

$$V_2 = \alpha_2 V_1 \quad (2)$$

α_2 为 Q_2 的占空比,控制器调节 Q_2 的占空比,使输出电压稳定在电池允许充电电压范围内,实现能量回馈。

图2为双向DC/DC变换器升降压控制框图。

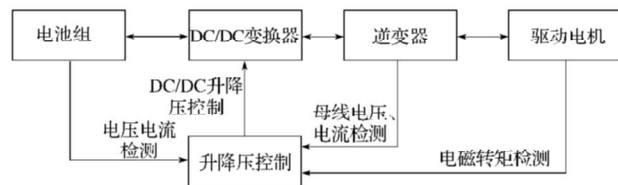


图2 电动汽车双向DC/DC变换器升降压控制框图

Fig.2 Buck-boost control diagram of bi-directional DC/DC converter for EV

2 各种工况下变换器的工作状态

一般情况下,汽车的运行状态包括:停车、起步、匀速、加速、减速、轻载、重载等工况,工况不同,DC/DC变换器的拓扑结构及其工作特性都是不同的。由电机机械功率与转矩和速度的关系可知:

$$P_{em} - P_{mec} = \Delta T \cdot \omega \quad (3)$$

式中: P_{em} ——电磁功率; P_{mec} ——负载功率; T ——机械转矩; ω ——机械角速度。

(1)当 $P_{em} > P_{mec}$ 时,电动汽车运行在加速或起步状态,电磁功率部分能量用于抵消负载功率,其余能量用于提速。此时,电池向电机输出功率,双向DC/DC变换器作为电源与电机驱动系统的中间能量控制单元运行在升压模式,抬高电池的电压等级,使驱动系统的直流母线电压提高到设定值以满足驱动要求。

(2)当 $P_{em} = P_{mec}$ 时,电动汽车运行在匀速状态,电机输出的电磁功率与机械功率相同,电磁转矩与负载转矩处于平衡状态,速度不变,电动汽车以恒定速度行驶。

此时电机应在作电动运行,双向DC/DC变换器仍然运行在升压模式下,能量从电池电压侧流向电机高压侧。

(3)当 $P_{em} < P_{mec}$ 时,电动汽车运行在减速或制动状态下,此时机械功率高于电磁功率,驱动电流方向变负,能量由电机侧回馈电池侧。为实现电动能量回馈,此时双向DC/DC变换器运行在降压模式下。

3 系统控制结构及控制器设计

3.1 系统控制结构

Buck-boost 双向DC/DC变换器采用电压-电流双闭环控制结构。电压控制器根据电压设定与输出电压之间的偏差,实时调节电流设定,电流控制器控制脉宽调制信号,使输出始终跟随给定,稳定输出电流和电压^[7-10]。

采用电压-电流双闭环控制模式可以保证DC/DC变换器的输出电压、电流保持在一个稳定的范围内,在升压过程中,能有效地减少逆变系统输入的直流电压纹波,保证驱动性能;在降压过程中,使变换器电压输出平稳,减少电流波动对电池充电性能所造成的影响。

传统的DC/DC变换器控制方法是通过PI控制器调节开关器件,从而达到调节输出电压的目的。但由于DC/DC变换器的非线性特点,控制往往达不到预期效果。模糊PI控制可动态修正控制器参数,提高系统对非线性的自适应能力,因此外环选择模糊PI控制器控制电压,其结构如图3所示。

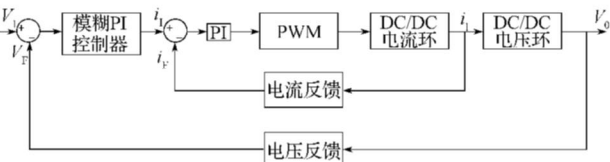


图3 电压-电流模式控制系统框图

Fig.3 Diagram of voltage-current mode control system

3.2 控制器的设计

设计模糊控制器用来实时修正调节器参数 K_p 和 T_i ,使PI参数随系统结构的变化不断进行调节,图4为模糊PI原理框图。

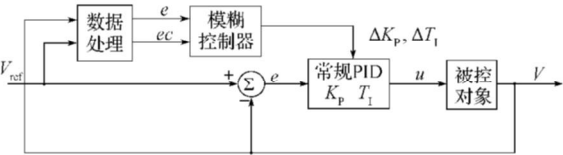


图4 模糊PI原理框图

Fig.4 Diagram of FuzzyPI control principle

3.2.1 输入输出变量的选取

DC/DC变换器电压的偏差及偏差变化率作为模糊控制器的输入变量,PI控制器的参数 K_p 、 T_i 由模糊控制器实时修正,修正公式如下:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p \\ T_i &= T_{i0} + \Delta T_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3.2.2 模糊规则确定

对误差 e 、误差变化率 ec 及控制参数的模糊集及其论域定义如下: e 和 ec 的模糊集为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},基本论域均为 $[-25,25]$; ΔK_p 和 ΔT_i 的模糊集为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},基本论域为 $[-0.3,0.3]$ $[-0.06,0.06]$;模糊规则为‘if .. then ...’条件语句。

当变换器的输出偏离设定很远时,占空比的变化必须较大,以使输出快速达到设定;当变换器的输出接近设定时,必须使用小的占空比;当达到设定,并且输出已经稳定时,占空比保持不变;当输出高于设定时,占空比下调,反之亦然。以此经验得到模糊规则描述如下:

If e =NB and ec =PB then ΔK_p =ZO

说明反馈电压值远远超出了给定电压值,产生了较大的偏差,但这种偏差正以较高的速度减少,因此模糊控制器不需要改变PI参数, ΔK_p 输出为零。

If e =NM and ec =PB then ΔK_p =NS

If e =NS and ec =PB then ΔK_p =NS

.....

针对比例参数调整共49条模糊规则,同理对PI控制器中积分参数的调整与比例参数的类似。通过实时调整PI控制的比例、积分参数,使双向DC/DC变换器输出具有良好的特性,满足电动汽车的要求。

比例、积分参数模糊控制规则见表1和表2。

表1 K_p 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table of K_p

e	ec						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
PM	NB	NM	NM	NM	NM	ZO	PS
PS	NM	NM	NS	NS	NS	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	ZO	PM	PM
NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
NM	NS	ZO	PS	PS	PS	PB	PB
NB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表2 T_i 模糊规则表

Tab.2 Fuzzy rule table of T_i

e	ec						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
PM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
PS	PB	PM	PS	PS	NS	NS	NM
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
NS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
NM	ZO	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
NB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

4 仿真结果

为了验证上述控制策略的有效性,应用仿真软件 Matlab/Simulink 进行数值仿真,模拟电动汽车启动、制动时双向DC/DC变换器电动升压到制动降压的工作过程,以电磁转矩的正负信号作为变换器升降压切换的控制信号,对传统单纯PI控制与模糊PI控制的控制效果进行对比分析。

双向DC/DC变换器的参数如下:

蓄电池侧 V_1	200 V
高压侧给定电压 V_2	700 V
高压侧 C_1	1 000 μ F
低压侧 C_2	330 μ F
电感 L_1	550 μ H

4.1 传统双闭环PI控制

仿真条件:负载电阻为100 Ω ;电压控制器 $K_p=0.5$ 及 $T_i=0.001$;电流控制器 $K_p=0.3$ 及 $T_i=0.01$ 。0~2.5 s,电动汽车启动,变换器运行在升压状态;2.5~5 s,电动汽车制动,变换器降压为蓄电池充电。仿真结果如图5、图6所示。

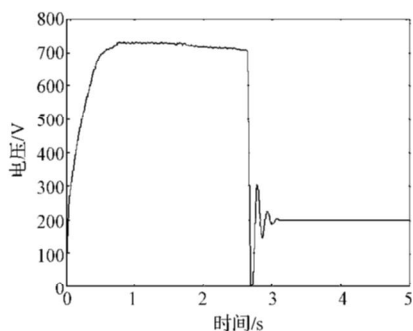


图5 传统PI控制下的输出电压

Fig.5 Output voltage of DC/DC converter with traditional PI controller

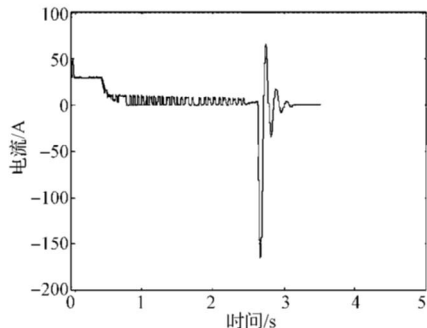


图6 传统PI控制下的输出电流

Fig.6 Output current of DC/DC converter with traditional PI controller

4.2 电压环模糊PI控制,电流环传统PI控制

仿真条件基本相同,仅模糊PI控制器的参数不同,模糊PI控制的初始参数 $K_p=0.28$, $T_i=0.001$,仿真结果如图7、图8所示。

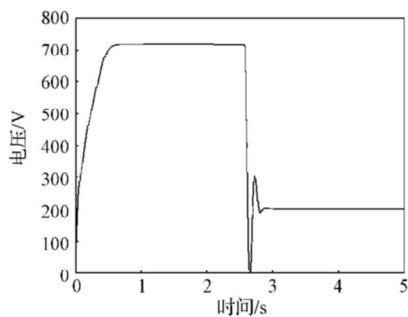


图7 模糊PI控制下的输出电压

Fig.7 Output voltage of DC/DC converter with fuzzy PI controller

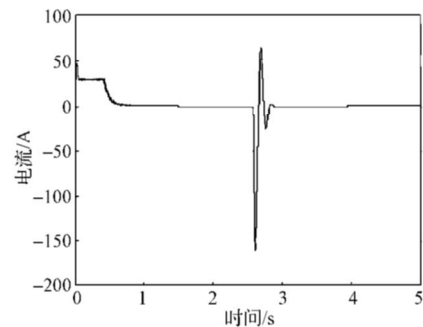


图8 模糊PI控制下的输出电流

Fig.8 Output current of DC/DC converter with fuzzy PI controller

图5、图6为传统PI控制下DC/DC变换器输出的电压和电流曲线。由仿真图形可知:(1)升压的动态过程不平稳,电压有较大震荡,同时电感电流出现尖峰;(2)动态响应速度慢,电压达到给定700 V需要0.8 s;(3)降压过程电压超调大,稳态误差 $>2.5\%$;(4)电压、电流纹波较多。

相比之下,模糊PI控制能够很好地解决系统的非线性问题,图7、图8为模糊PI控制下的电压、电流曲线。由图可知:(1)升压动态过程平稳,无明显震荡现象,输出电流尖峰少且数值较小;(2)响应速度快,达到稳态仅需0.4~0.6 s;(3)电压、电流纹波分量 $<1\%$;(4)降压过程动态响应快,稳态误差小。

5 结语

设计了车用双向DC/DC变换器,电压环采用模糊PI控制器,解决系统变结构、非线性问题;电流环动态控制电流,保护设备安全,提高升降压速度。仿真结果表明:与传统PI控制相比,模糊PI控制可有效提高DC/DC变换器的鲁棒性,减小输出电流、电压纹波。

参考文献:

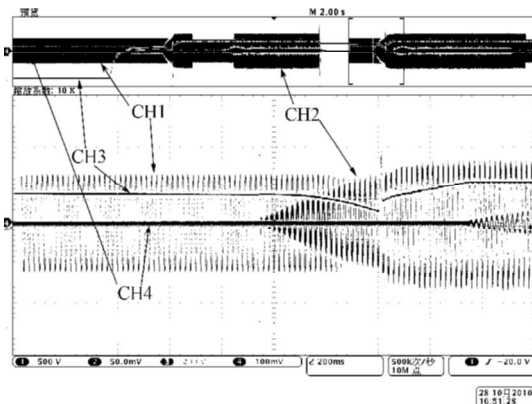
- [1] 李健.电动汽车双馈级联驱动再生制动控制系统仿真[D].沈阳:沈阳工业大学,2011.
- [2] 郑宗华.DC-DC功率开关变换器的非线性控制研究[D].沈阳:东北大学,2008.

(下转第43页)

终完成网侧变流器并网。然后启动机侧变流器,机侧变流器逆变三相交流为发电机转子提供励磁电流,实现发电机定子输出电压与电网电压相位、幅值同步,最终完成机侧变流器并网,这个过程同样也需要400 ms。因为风机突然停机,发电机转速会有很大冲击;同时考虑电网电压幅值计算延迟、变桨延迟。所以,为了确保变流器不产生误动作,在电网电压恢复后,加一段延迟。因此,从电网恢复到发电机并网发电,一般情况下1~2 s可以完成,且在10 s内达到额定功率,整个过程中,变流器必须无故障,风机必须不脱网安全运行。

4.2 模拟电网电压完全掉电到恢复时波形

为了验证该控制方案能够穿越零电压,在风机正常运行时,我们把电网电压断开,经1~2 s再合上电网电压,观察风机能否再次启动。实验波形如图4所示。



注:CH1通道为电网电压 u_g ;CH2通道为网侧变流器输出电流波形 i_1 ;CH3通道为直流母线电压波形 u_{dc} ;CH4通道为发电机定子输出电流波形 i_s ;CH1通道的横坐标每隔0.2 s,纵坐标每隔50 V。CH2通道横坐标为0.2 s,纵坐标每隔为50 A;CH3通道横坐标为0.2 s,纵坐标每隔为200 V;CH4通道横坐标为0.2 s,纵坐标每隔为100 V

图4 风机穿越零电压时实验波形

Fig.4 Waveforms with the converter control variables during the entire process of the zero-grid-voltage

从图中看出,当电网电压恢复到额定值之后,变流器延迟800 ms,然后才启动网侧变流器,最终变流器完全实现零电压穿越。

5 结语

为了验证该控制方案的有效性和实用性,借助南车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部的样机对整个不间断运行过程进行了试验研究。在电网电压严重不对称或零电压两种情况下,分别验证了该控制方案的正确性。该控制方案的不足是,当风机在额定转速下突然停机时,发电机转速会加速,这时,由于机械惯性变桨反应太慢,转速太高,导致并网速度减慢。这个问题的解决有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 中国电力科学研究院. 风电场接入电网技术规定[S]. 修订版. 北京: 国家电网公司, 2009.
- [2] 胡家兵, 孙丹, 贺益康. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- [3] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 164-170.
- [4] 郑艳文, 李永东, 柴建云. 不平衡电压下双馈发电机系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 89-93.
- [5] 张学广, 徐殿国, 潘伟明, 等. 基于电网电压定向的双馈风力发电机灭磁控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 95-99.
- [6] 徐凤星, 刘连根, 盛建科, 等. 双馈风力发电机网侧变流器的一种新型并网控制研究[J]. 电气传动, 2010, 40(2): 18-21.
- [7] Hughes F M, Anaya-Lara O, Jenkins N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation[J]. IEEE Trans. on power Syst., 2006, 21(2): 763-772.
- [8] Pena R S, Cardenas R J, Asher G M, et al. Vector controlled induction machines for stand-alone Wind Energy Application[C]// Industry Applications Conference Record of the 2000 IEEE, Italy, 2000: 1409-1415.
- [9] Ramod C J, Martins A P, Araujo A S, et al. Current control in the grid connection of the double-output induction generator linked to a variable speed wind turbine[J]. IECON 02, 2002: 979-984.

(上接第16页)

- [3] 闫媛媛. 非线性控制策略在DC/DC电力电子变换器中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [4] 吴恒亮, 谢伟. 一种基于交错控制的串联输入并联输出高效双全桥DC/DC变换器[J]. 大功率变流技术, 2010(6): 1-3.
- [5] 胡庆, 于海燕, 夏桂文, 等. 滑模变结构控制在DC-DC变换器中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2002, 24(1): 57-60.
- [6] 许海平, 孙昌富, 马刚, 等. 基于DSP的燃料电池车用双向DC-DC变换器的研究[J]. 电气自动化, 2004, 26(3): 33-36.
- [7] 杭丽君, 姚文熙, 吕征宇. 基于DSP控制的数字式双向DC/DC变换器的实现[J]. 电源技术应用, 2009, 7(3): 160-163.

- [8] Sato Y, Kataoka T. State feedback control of current-type PWM AC-to-DC converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(6): 1090-1097.
- [9] Sato Y, Ishizuka T, Nezu K, et al. A New Control Strategy for Voltage-Type PWM Rectifiers to Realize zero Steady-state Control Error in Input Current[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(3): 480-486.
- [10] Caponet M C, Profumo F, De Doncker R W, et al. Low Stray Inductance Bus Bar Design and Construction for Good EMC Performance in Power Electronic Circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 225-231.