

基于 R-S-T 控制的复合电源双向 DC/DC 变换器设计

荣德生, 代雨晴, 赵君君, 徐广璐, 陈淑涵

(辽宁工程技术大学, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为了提高复合电源双向 DC/DC 变换器工作过程中的动态特性, 提出一种用于三通道交错并联双向 Buck/Boost 变换器的 R-S-T 控制策略。分析该变换器在 Buck/Boost 模式下工作过程, 建立了交流小信号模型并得出控制变量到状态变量的传递函数, 在此基础上设计了双向 DC/DC 变换器的 R-S-T 控制系统。相较于传统的 PI 控制, R-S-T 控制策略具有更好的动态和稳态响应特性, 最后运用 Matlab/Simulink 软件对该变换器系统进行仿真。结果表明, 基于 R-S-T 控制的复合电源双向 DC/DC 变换器具有响应速度更快, 超调量更小, 鲁棒性更强的特点。

关键词: 复合电源; R-S-T 控制; 交错并联磁集成; 双向 Buck/Boost 变换器;

Design of hybrid power bi-directional DC/DC converters based on R-S-T control strategy

RONG Desheng, DAI Yuqing, ZHAO Junjun, XU Guanglu, CHEN Shuhan

(Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In order to improve the working process in dynamic performance of the hybrid power bi-directional DC/DC converter, R-S-T control strategy is put forward for three-channel staggered parallel bi-directional Buck/Boost converter. The working process of converter in Buck/Boost mode is analyzed by magnetic integration theory, AC small signal model is established and the transfer function from control variables to the state variables is obtained, based on which the R-S-T control system of bi-directional DC/DC converter is designed. Compared to traditional PI control method, R-S-T control strategy has better dynamic and steady-state response characteristics in controlling three-channel staggered parallel bidirectional converter. Finally, the converter system is simulated by using Matlab/Simulink software. The simulation results show that the hybrid power bi-directional DC/DC converter based on R-S-T control has faster response speed, smaller overshoot volume, and stronger robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177067).

Key words: hybrid power; R-S-T control; staggered parallel magnetic integration; bi-directional Buck/Boost converter

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)07-0132-06

0 引言

电源作为电子设备的动力来源, 是网络通信、航天工程、自动化等科技领域中电子设备的动力保障, 随着科技的不断发展电力电子类产品与人类的生产、生活越发紧密^[1]。复合电源包括主储能、辅助储能以及能量转换系统, 将两种性能互补的储能结合, 具有高功率密度和高能量密度的双重优点^[2-3]。各领域在大量应用 DC/DC 功率变换器的同时对动态特性提出了更高的要求, 提高变换器系统稳定性与快速性是提高变换器性能的环节。

文中分析了三相磁集成 Buck/Boost 工作模式并分别进行交流小信号建模, 得到 Buck/Boost 模式等

效电路以及控制变量到状态变量的传递函数^[4]。针对三通道交错并联磁集成双向 DC/DC 变换器系统的非线性特性, 提出了一种电压电流双闭环的多项式 (R-S-T) 控制使方案, 电流内环有快速性和及时抗干扰性, 可有效地抑制负载扰动影响且提高控制对象的性能使得电压外环设计更加简单。最后通过仿真表明, 较传统 PI 线性控制 R-S-T 控制能够有效提高系统的动态响应速度, 同时具有良好的稳态性能。

1 三相交错并联双向 DC/DC 变换器 Buck/Boost 模式建模分析

1.1 复合储能系统等效电路

图 1 所示为超级电容与蓄电池复合电源系统的三相交错并联磁集成 Boost/Buck 变换器等效电路拓扑^[5-7]。当功率开关管 S_2 、 S_4 、 S_6 按占空比导通 S_1 、

S_3 、 S_5 关断时, 电流由高压侧流向低压侧电路处于 Boost 工作状态; 反之, 当功率开关管 S_1 、 S_3 、 S_5 按占空比导通 S_2 、 S_4 、 S_6 关断时, 电流由低压侧流向高压侧电路处于 Buck 工作状态。其中高压侧是蓄电池视为恒压源, 低压侧是超级电容视为 C_{sc} 与 R_{esr} , 端电压为 V_{sc} 。各通道电感绕组上的电压分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 , 电感的自感分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 。定义电路中的耦合电感对称且反向, 并且自感值相同即 $L_1=L_2=L_3=L$, 互感值为 M , $-0.5 \leq M/L \leq 0$ ^[5-6]。

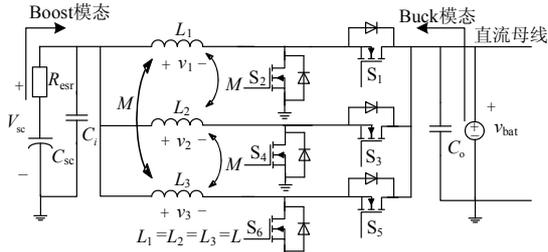


图 1 复合电源主电路

Fig. 1 Main circuit of composite power

在复合电源系统处于 Buck 工作状态时, 超级电容通过交错并联磁集成双向 Buck/Boost 变换器进行能量的吸收, 完成对超级电容安全快速地充电, 采取恒压限流使超级电容充电电压稳定, 内环加速系统动态响应速度并限制了充电电流。反之, 在复合电源系统处于 Boost 工作状态时, 超级电容通过交错并联磁集成双向 Buck/Boost 变换器向负载提供启动、加速所需的瞬时功率, 蓄电池向负载提供正常运行所需的额定功率, 超级电容的放电电流通过变换器补给蓄电池的额定放电电流向负载提供电能, 确保蓄电池不发生大电流放电^[7-9]。

1.2 Buck/Boost 变换器电路小信号模型

对主电路中的耦合电感进行解耦可得到下面的等效电路, 如图 2 所示。

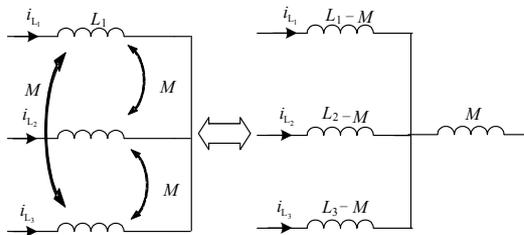


图 2 耦合电感等效电路

Fig. 2 Coupling inductance equivalent circuit

当双向 DC/DC 变换器处于连续导通(CCM)状态时, 利用状态空间平均法, 分别对双向变换器的 Buck 工作模式与 Boost 工作模式列写状态空间方程, 则式(1)所示为 Buck 工作模式下的交流小信号动态模型^[10]。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} L_1 & M & M \\ M & L_2 & M \\ M & M & L_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{L_1}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_{L_2}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_{L_3}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_3 \\ D_5 \end{bmatrix} \cdot \hat{v}_{bat}(t) + V_{bat} \cdot \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_3 \\ \hat{d}_5 \end{bmatrix} - \hat{v}_{sc}(t) - [\hat{i}_{L_1}(t) + \hat{i}_{L_2}(t) + \hat{i}_{L_3}(t)] \cdot R_{esr} \\ C_o \cdot \frac{d\hat{v}_o(t)}{dt} = \hat{i}_{L_1}(t) + \hat{i}_{L_2}(t) + \hat{i}_{L_3}(t) \end{cases} \quad (1)$$

采用受控电流源、受控电压源和 $1:D$ 理想变压器等效, 建立 CCM 模式下同步整流 Buck 变换器线性交流小信号电路如图 3 所示。

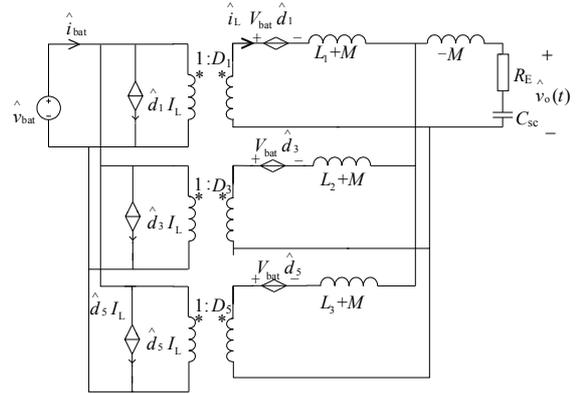


图 3 Buck 模式下小信号等效电路

Fig. 3 Small equivalent circuit in Buck mode

经过推导与整理可得到 Buck 模式下控制变量

$\hat{d}(s)$ 到状态变量 $\hat{i}_L(s)$ 传递函数为

$$G_{id}(s) = \frac{V_{bat} \cdot C_{sc} \cdot s}{[(L+2M) \cdot C_{sc} \cdot s^2 + 3 \cdot R_{esr} \cdot C_{sc} \cdot s + 3]} \quad (2)$$

如式(3)为 Boost 工作模式下整的交流小信号动态模型^[10]。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} L_1 & M & M \\ M & L_2 & M \\ M & M & L_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{L_1}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_{L_2}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_{L_3}}{dt} \end{bmatrix} = \hat{v}_{sc}(t) - \begin{bmatrix} D'_2 \\ D'_4 \\ D'_6 \end{bmatrix} \cdot \hat{v}_o(t) + V_o \cdot \begin{bmatrix} \hat{d}_2 \\ \hat{d}_4 \\ \hat{d}_6 \end{bmatrix} \\ C_o \cdot \frac{d\hat{v}_o(t)}{dt} = D'_2 \cdot \hat{i}_{L_1}(t) - I_{L_1} \cdot \hat{d}_2(t) + D'_4 \cdot \hat{i}_{L_2}(t) - I_{L_2} \cdot \hat{d}_4(t) + D'_6 \cdot \hat{i}_{L_3}(t) - I_{L_3} \cdot \hat{d}_6(t) - \frac{\hat{v}_o(t)}{R_{bat}} \end{cases} \quad (3)$$

采用受控电流源 $I_L \hat{d}$ 代替主开关管, 受控电压源 $V_o \hat{d}(t)$ 代替同步整流管, 理想变压器变比为 $D':1$, 建立 CCM 模式下同步整流 Boost 变换器线性交流小信号电路如图 4 所示。

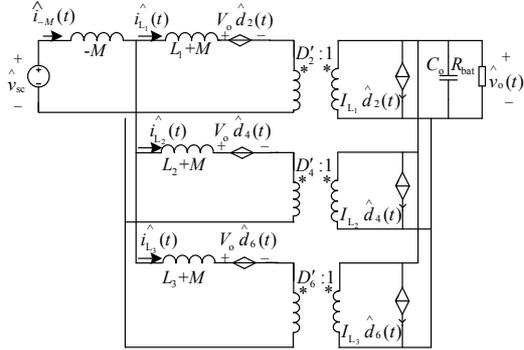


图 4 Boost 模式下小信号等效电路

Fig. 4 Small equivalent circuit in Boost mode
经过推导与整理可得到 Boost 模式下控制变量

$\hat{d}(s)$ 到状态变量 $\hat{i}_L(s)$ 的传递函数 $\hat{i}_L(s)$:

$$G_{id}(s) = \frac{[V_o \cdot C_o \cdot s + \frac{2V_o - V_{bat}}{R_{bat}}]}{[(L+2M) \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L+2M}{R_{bat}} + 3 \cdot D'^2]} \quad (4)$$

2 Buck/Boost 工作模式 R-S-T 控制器计

在 Buck 与 Boost 工作过程中分别采用电压、电流双闭环控制方式, 其控制框图如图 5 所示^[11-13]。在系统处于 Buck 工作过程时, 电压外环的超级电容电压通过多项式控制器后得到电容电流的期望值, 再经线性化处理得到电感电流参考值, 将所得的电感电流参考值给入电流内环多项式控制器后经过线性化处理得到 Buck 模式下的主开关管导通占空比, 再经 PWM 调制信号调制得到驱动信号, 结构上实现对低压侧充电电压控制, 限制了电感电流大小, 电流环提高了系统动态响应速率。

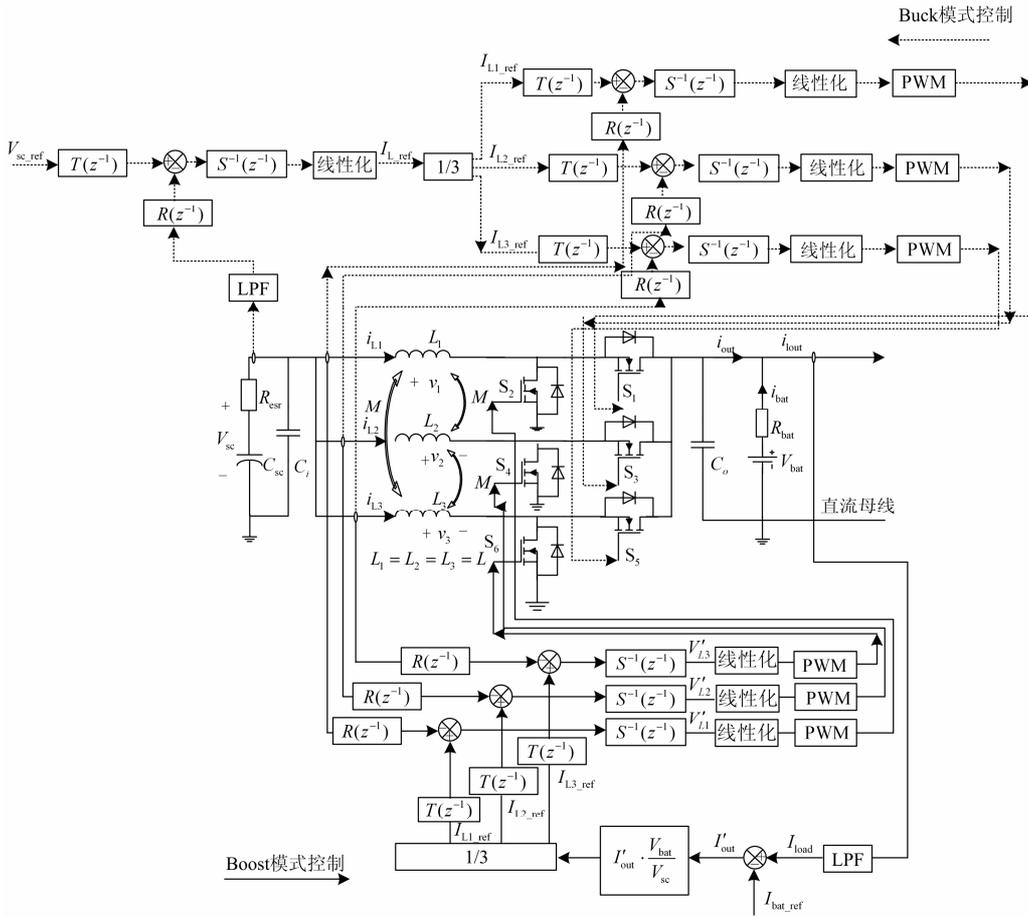


图 5 控制电路

Fig. 5 Control circuit in Buck mode

在系统处于 Boost 工作过程时, 将负载电流与蓄电池的最大安全放电电流基准值进行作差运算得

出超级电容的输出期望值, 然后经低通滤波器与守恒等式得到超级电容的输出电流期望值。为了降低

各通道的误差, 分别采用三个支路对电感电流加以控制, 而且系统中的电流环能够增加对功率需求的响应速度, 达到了超级电容输出电流对蓄电池电流的补偿作用, 避免了蓄电池频繁过充或过放现象的产生。

定义在使稳态误差值为零时, 多项式 $R(z^{-1})$ 、 $S(z^{-1})$ 、 $T(z^{-1})$ 的代数式为

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = r_0 + r_1 \cdot z^{-1} + \dots + r_{n_r} \cdot z^{-n_r} \\ S(z^{-1}) = s_0 + s_1 \cdot z^{-1} + \dots + s_{n_s} \cdot z^{-n_s} \\ T(z^{-1}) = t_0 + t_1 \cdot z^{-1} + \dots + t_{n_r} \cdot z^{-n_r} \end{cases} \quad (5)$$

变换器开环控制离散时间传递函数为

$$H(z^{-1}) = z^{-d} \cdot \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = z^{-d} \cdot \frac{b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + \dots + b_m \cdot z^{-m}}{a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_n \cdot z^{-n}}, (m \leq n) \quad (6)$$

变换器闭环控制特征方程为

$$H_{cl}(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{C(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1}) \cdot T(z^{-1})}{A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + B(z^{-1}) \cdot R(z^{-1})} \quad (7)$$

双向 DC/DC 变换器电流、电压控制环采用相同的开环传递函数, 表达式为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{L_x \cdot s} \quad (8)$$

采用零阶保持器法进行 z 变换, 得到离散化后的开环离散时间传递函数为

$$H(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{T_s}{L_x} \cdot \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (9)$$

为了确保闭环中静态增益一致有

$$\begin{cases} \lim_{z \rightarrow 1} H_{cl}(z^{-1}) = \frac{B(1) \cdot T}{A(1) \cdot S(1) + B(1) \cdot R(1)} = 1 \Rightarrow T = r_0 + r_1 \\ S(1) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

期望闭环多项式 $P(z^{-1})$ 定义为

$$A_{cl}(z^{-1}) = 1 + p_1 \cdot z^{-1} + p_2 \cdot z^{-2} \quad (11)$$

将式(7)代入式(13), 得到期望多项式:

$$A_{cl}(z^{-1}) = 1 + \left(\frac{T_k}{L_x} r_0 - 2 \right) \cdot z^{-1} + \left(\frac{T_k}{L_x} r_1 - 2 \right) \cdot z^{-2} \Rightarrow \begin{cases} r_0 = \frac{L_x}{T_s} \cdot (p_1 + 2) \\ r_1 = \frac{L_x}{T_s} \cdot (p_2 - 1) \end{cases} \quad (12)$$

采用 PWM 的开关频率, 控制采样时间 T_s , 闭环带宽 ω_n 。最终, 得到期望闭环多项式表达式为

$$P(z^{-1}) = A_{cl}(z^{-1}) = (1 - z^{-1} \cdot e^{-\omega_n T_s})^2 \quad (13)$$

由 R-S-T 控制的三通道交错并联磁集成双向变换器在 Buck 模式时, 电压电流双闭环的结构为实现对低压侧充电电压的控制, 同时限制电感电流的大小, 电流环用以提高控制的动态响应速率。在 Boost 模式时该控制用以实现超级电容输出电流对蓄电池电流的补偿作用, 避免蓄电池频繁的过充或放电现象产生。

3 仿真电路分析与验证

采用 Matlab/simulink 仿真软件对三通道交错并联磁集成双向 Buck/Boost 变换器的 Buck/Boost 运行模式进行了仿真验证如图 6 所示^[8]。图 6(a)为 Buck 工作模式下主电路仿真图, 图 6(b)为 Boost 工作模式下主电路仿真图。在 Buck 模态下高压侧 $V_{bat}=24$ V, 低压侧 $V_{sc}=10.8$ V, 每通道开关频率 $f_s=20$ kHz, 输出侧由 4 个 2.7 V/300 F 的串联超级电容组成, 耦合电感自感 $L=0.00011$ H, 耦合度 $k=-0.42$, 滤波电容 $C_o=0.0004$ F, $k_{pv}=2.2$, $k_{iv}=88$, $k_{pi}=0.15$, $k_{ii}=12$, 对电感电流与开关管压降进行检测, 仿真结果如图 7 所示。

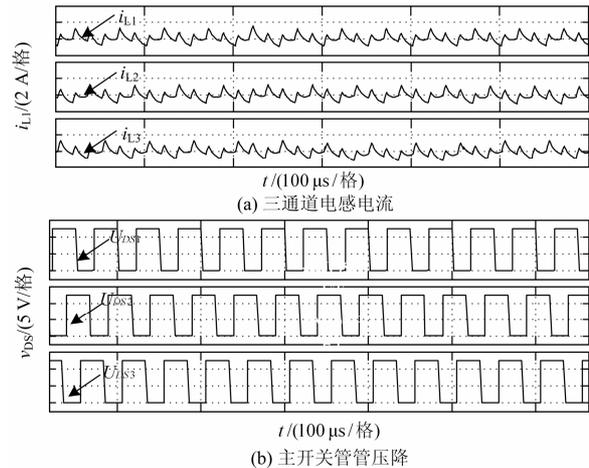


图 7 Buck 工作模式下的稳态仿真结果

Fig. 7 Steady-state simulation waveform in Buck mode

图 7 中, i_{L1} 为通道电流, U_{DS1} 为 MOS 管的管压降, 总输出电流为 6 A, 每通道平均电流为 2 A。验证 Buck 模式下动态特性时高压侧为单直流电源, 输出侧为电阻负载, 输出电压及输出电流的变化如图 8 所示。

图 8 表明: 负载突变时系统的动态响应速度为几十毫秒, 且 R-S-T 控制超调量与调节时间更小。

在 Boost 模式下低压侧为 4 个 2.7 V/300 F 超级电容串联, 低压侧 $V_{sc}=10.8$ V, 高压侧为 2 个 12 V 蓄电池串联, 高压侧 $V_{bat}=24$ V, 每通道开关频率 $f_s=20$ kHz。分别采用 PI 与 R-S-T 控制方案对变换器

控制, 负载电流为 45 A。设定超级电容经变换器输出电流为 15 A 时这两种控制情况进行对比仿真如图 9 所示。

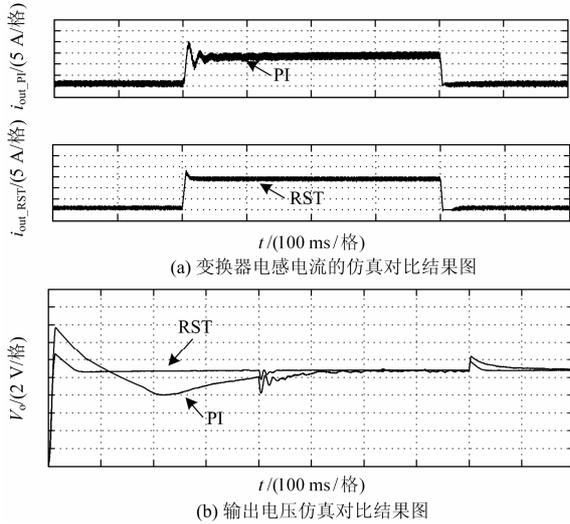


图 8 动态试验仿真对比波形

Fig. 8 Dynamic test simulation waveform comparison in Boost mode

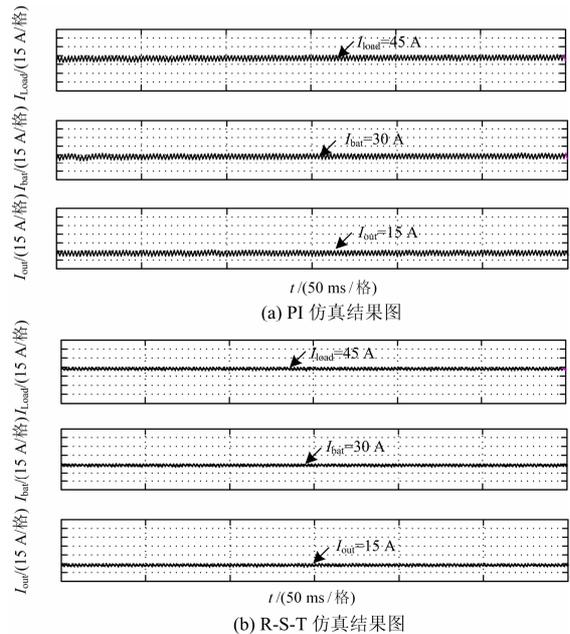


图 9 Boost 模式下负载、变换器、蓄电池输出电流对比图

Fig. 9 Comparison of load, converter, battery output current in Boost mode

图 9 表明: 两种控制方法均可使变换器输出电流很好的跟踪控制中设定的电流要求, 而采用 R-S-T 控制方法的仿真结果纹波更小。

4 结论

研究了由蓄电池—超级电容组成的复合电源系

统双向 DC/DC 变换器在不同工作状态下的建模与控制的问题。针对更好的实现系统的动态特性, 提出了一种应用于非线性系统的 R-S-T 控制方法, 首先对系统中三通道交错并联磁集成 Buck/Boost 变换器的工作模态进行分析, 分别建立出 Buck 与 Boost 模态下的交流小信号模型, 得到控制变量到状态变量的传递函数。然后采用双闭环控制策略并设计出 R-S-T 控制器, 分别对两工作模态进行仿真验证, 相较于传统线性 PI 控制 R-S-T 具有更好的动态性能与稳态特性。最后, 仿真结果表明基于 R-S-T 控制的复合电源系统具有较快的响应速度, 较小的超调量以及更强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 陈珊珊, 马建伟. 超级电容和蓄电池混合储能系统 THIPWM 算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 111-115.
CHEN Shanshan, MA Jianwei. Research of super capacitor and battery hybrid energy storage system with the THIPWM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 111-115.
- [2] 高明远. 双向 DC-DC 变换器基于切换系统的建模与储能[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 129-134.
GAO Mingyuan. Modeling and energy storage control for bi-directional DC-DC converter based on switching system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 129-134.
- [3] 王冕, 田野, 李铁民, 等. 应用于储能系统的双向 DC-DC 变换器研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.
WANG Mian, TIAN Ye, LI Tiemin, et al. Study of bidirectional DC-DC converters applied to energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 66-71.
- [4] 童亦斌, 吴峰, 金鑫民, 等. 双向 DC-DC 变换器的拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 23(27): 81-86.
TONG Yibin, WU Tong, JIN Xinmin, et al. Study of bi-directional DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 23(27): 81-86.
- [5] 王玉斌. 单相并网逆变器前级交错并联 DC/DC 变换器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 66-71.
WANG Yubin. Study of interleaved DC/DC converter used in the first-stage of single-phase grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 66-71.
- [6] 杨玉岗, 李涛, 冯本成. 交错并联磁集成双向 DC/DC 变换器的设计准则[J]. 中国电机工程学报, 2012, 25(4): 37-43.

- YANG Yugang, LI Tao, FENG Bencheng. Design criterion for interleaving and magnetically integrated bidirectional DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 25(4): 37-43.
- [7] 孙晋坤, 刘庆丰, 冷朝霞, 等. 高阶并联 Buck 变换器稳定性分析的等效模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 164-172.
- SUN Jinkun, LIU Qingfeng, LENG Chaoxia, et al. Equivalent model for stability analysis of higher order paralleled buck converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 164-172.
- [8] 马皓, 祁峰, 张霓. 基于混杂系统的 DC-DC 变换器建模与控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 92-96.
- MA Hao, QI Feng, ZHANG Ni. Modeling and control for DC/DC converters based on hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 92-96.
- [9] 张晓峰, 吕征宇. 混合动力车用全数字电流控制型双向 DC/DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 84-89.
- ZHANG Xiaofeng, LÜ Zhengyu. Digital-current controlled bi-directional DC/DC converter in the hybrid electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 84-89.
- [10] 王开艳, 王春芳, 张玲丽. CCM 和 DCM 模式 Buck 变换器建模与混沌现象仿真[J]. 系统仿真报, 2008, 20(14): 3881-3887.
- WANG Kaiyan, WANG Chunfang, ZHANG Lingli. Modeling and chaotic phenomena simulation of Buck converter in CCM and DCM[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14): 3881-3887.
- [11] 郑鹏程, 石玉, 周立文, 等. 基于 MATLAB 的 DC/DC 变换器设计与闭环仿真[J]. 磁性材料与器件, 2011, 8(8): 63-66.
- ZHENG Pengcheng, SHI Yu, ZHOU Liwen, et al. Design and closed-loop simulation of DC / DC converter based on MATLAB[J]. Magnetic Materials and Devices, 2011, 8(8): 63-66.
- [12] 屈鲁. Buck/Boost 变换器的无源滑模控制研究[J]. 电源学报, 2013, 3(2): 105-109.
- QU Lu. Analysis on the passivity and sliding-mode control of the Buck-Boost converter[J]. Journal of Power, 2013, 3(2): 105-109.
- [13] TAO H, KOTSOPOULOS A, DUARTE J L, et al. Multi-input bidirectional DC-DC converter combining DC-link and magnetic-coupling for fuel cell systems[C] // Proc IEEE IAS, Hong Kong, China, 2013, 113: 2021-2028.

收稿日期: 2014-06-06; 修回日期: 2014-10-25

作者简介:

荣德生(1975-), 男, 在读博士, 副教授, 主要从事节能型电力电子技术及应用的研究。E-mail: 2107470795@qq.com

(编辑 张爱琴)