

文章编号: 1002-0411(2007)04-0506-08

三相电压源型 PWM 逆变器相电流重构策略研究

刘艳^{1,2}, 邵诚¹

(1. 大连理工大学先进控制技术研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 大连大学信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 基于直流电流、开关状态及三相电流之间的关系, 提出用直流电流和开关状态重构逆变器相电流的新方法. 开关状态由改进型电流滞环数字控制器产生. 为减小测量噪声和重构相电流误差, 设计了 IIR (Infinite Impulse Response) 数字滤波器. 以感应电机矢量控制系统为例进行了仿真研究, 结果表明新方法是有效的、准确的. 该方法仅需一个直流电流传感器, 降低了电机驱动系统成本, 提高了系统的容错能力. 该方法与电机模型参数及负载变化无关, 适用于所有三相平衡电流的交流电机驱动系统.

关键词: PWM 逆变器; 电流重构; 直流电流传感器; 开关状态; 电流滞环控制

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Reconstruction Strategies for Phase Currents in Three Phase Voltage-Source PWM Inverters

LIU Yan^{1,2}, SHAO Cheng¹

(1. Institute of Advanced Control Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Information Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Based on the relationship among DC-link current, switching states and three phase current, a new method using DC-link current and switching states is proposed to reconstruct all inverter phase currents. The generation of switching states is based on the improved current hysteresis-band digital controller. The IIR (Infinite Impulse Response) digital filter is designed to reduce the measurement noise and the errors from reconstructing the phase currents. The simulation results obtained from a vector-controlled induction motor are used to show the effectiveness and accuracy of the new method. Within the scheme, only one DC-link current sensor is used, which reduces the cost and enhances the fault-tolerance performance of the drive system. The proposed algorithm is independent of the motor model parameters and the load applied; therefore, it can be applied to any 3-phase motor drive systems operating under balanced phase current regulation.

Keywords: PWM inverter; current reconstruction; DC-link current sensor; switching state; current hysteresis-band control

1 引言 (Introduction)

在高性能的交流电机驱动系统中, 常常需要对电压源型 PWM 逆变器的相电流进行闭环控制, 以获得高精度的三相正弦波电流, 进而保证快速、准确的电磁转矩控制. 典型的电压源型 PWM 逆变器主电路如图 1 所示, 交流输出端设置 3 个或者至少 2 个相电流传感器, 用以提供相电流反馈信号, 直流电流传感器常用于过流保护.

常用的电流传感器是霍尔效应检测器, 它不仅

价格昂贵, 而且体积庞大, 难以集成在电力电子装置中. 近些年来, 为减少电流传感器数目, 减小设备体积, 降低设备成本, 提高系统运行可靠性, 逆变器相电流估计问题的研究备受关注. Green^[1] 等人首次提出利用直流电流估计逆变器相电流的思想. 之后, 该思想得到了不断发展, 文[2]提出基于直流电流信息、利用最小二乘法辨识相电流的方法, 方法具有一定的通用性和实用价值, 但要求开关频率较低, 应用范围有限. 基于定子电压空间向量轨迹控制的重构方法^[3,4], 因逼近圆形旋转磁场控制的需要, 开关状

态变化频繁,算法相对复杂.参考模型自适应电流重构法^[5]借助电机模型去估计相电流,重构电流精度受电机模型参数影响较大.文[6]利用集成于场效应管内部的辅助电流传感器,成功地用部分相电流信息重构出逆变器全部相电流,完全摒弃了笨重的霍尔效应检测器,但在电流重构过程中,涉及坐标旋转变换及三角函数计算,而且负载性质不同时,重构算法需要修正.

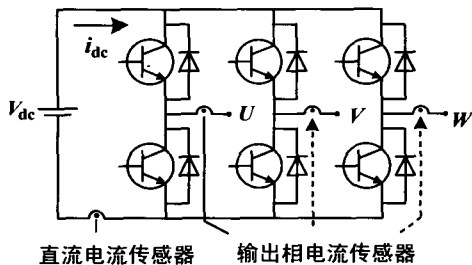


图 1 电压源型逆变器主电路

Fig. 1 Main circuit of voltage source inverter (VSI)

本文在分析研究直流电流、开关状态及交流相电流之间关系的基础上,提出一种基于直流电流传感器和开关状态重构逆变器相电流的新方法.在模拟电流滞环控制特性基础上,设计一个新型数字电流滞环控制器,为功率器件提供驱动信号,为电流重构环节提供开关状态信息.在相电流重构过程中,提出用最近更新的两相电流去预测第三个相电流的新思路.为消除直流电流传感器中的测量噪声对重构电流波形的影响,减小重构电流误差,设计了 IIR 数字滤波器.最后,以感应电机矢量控制系统为例,进

行了相电流重构策略的仿真实验研究.

2 相电流重构方案 (Phase current reconstruction scheme)

图 1 所示驱动系统中的逆变器通常为 180° 导通型,开关状态、直流电流 i_{dc} 及实际相电流之间存在如表 1 所示的关系.在开关状态为“0(000)”或“7(111)”时,逆变器上(或下)桥臂的所有功率器件开通, i_{dc} 为 0, i_{dc} 不能反映相电流的任何有效信息.另外,在全控型器件关断(或二极管续流)期间, i_{dc} 也不能反映相电流的变化规律.除此之外,其它开关状态下的相电流均可由直流电流 i_{dc} 表示.

表 1 开关状态、直流电流及相电流之间关系

Tab. 1 Relationship among switching states, DC-link current and 3-phase currents

开关状态	S_c	S_b	S_a	i_{dc}
0	0	0	0	0
1	0	0	1	i_a
2	0	1	0	i_b
3	0	1	1	$-i_c$
4	1	0	0	i_c
5	1	0	1	$-i_b$
6	1	1	0	$-i_a$
7	1	1	1	0

基于上述分析,本文提出了重构实际相电流的新方法,重构原理如图 2 所示,算法流程图见附录 1.

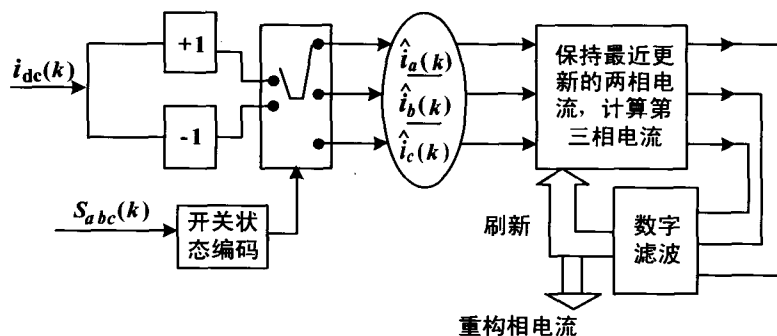


图 2 相电流重构原理图

Fig. 2 Principle of phase current reconstruction

在每个采样周期中,测量直流电流 $i_{dc}(k)$ 的值,根据功率器件的当前开关状态 $S_{abc}(k)$ 及表 1 关系,

进行相电流更新.因为每次仅有一相电流被更新,为减少电流重构过程中的估计误差,解决二极管续流

期间相电流的有效估计问题,在电流重构过程中,采用了由最近更新的二相电流去预测估计第三相电流的新方法(如 $i_{cs}(k) = -(i_{cs}(k-1) + i_{bs}(k))$),其中“s”为定子.另外,功率器件开关过程中存在较高的 dv/dt ,这会在直流电流传感器中引起电磁噪声,如图3所示.虽然增设缓冲电路可在一定程度上缓解这一问题,但无法完全消除,为削弱它对电流重构的影响,设计了形如(1)式的IIR数字滤波器.利用其迭代学习功能克服测量噪声和估计误差的影响,改善重构电流质量.

$$h(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}} \quad (1)$$

其中, n 为 IIR 滤波器的阶, $a_0 \sim a_n, b_0 \sim b_n$ 为滤波器的系数.

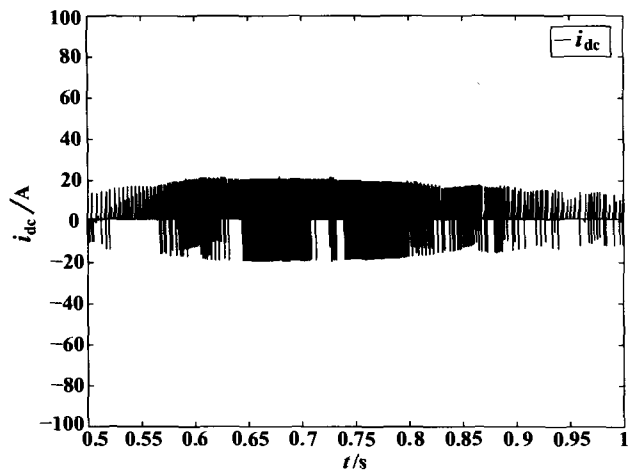


图3 逆变器直流回路电流 i_{dc}

Fig.3 DC-link current (i_{dc}) of the inverter

3 开关状态生成器 (Switching state generator)

3.1 模拟电流滞环控制

为使负载电机得到正弦波电流,获得理想的转矩控制特性,在变频调速系统中,常用电流滞环跟踪 PWM 技术对定子电流实行闭环控制.图4为模拟电流滞环控制的 PWM 变压变频器的 A 相控制原理图.其中,输入信号是来自控制器的给定电流 i_a^* 与电源实际相电流 i_a 的偏差 Δi_a ,输出用于驱动逆变器 A 相上(或下)桥臂的功率器件动作. B、C 二相的原理均与此相同.

3.2 数字电流滞环控制

基于传统的模拟电流滞环控制特性,本小节设计了一个改进型的数字电流滞环控制器,如图5所

示,为功率器件提供驱动信号,为电流重构环节提供开关状态信息,算法流程图见附录2.

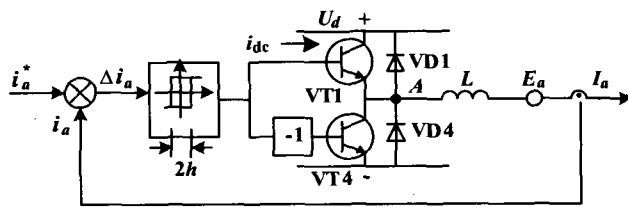


图4 电流滞环跟踪控制的 A 相原理图

Fig.4 A phase current hysteresis-band tracking control

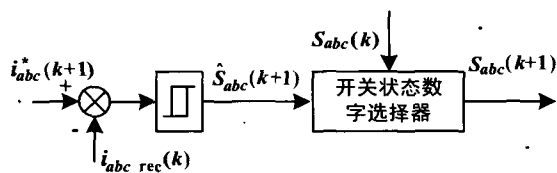


图5 数字电流滞环控制

Fig.5 Digital current hysteresis-band control

设计的数字电流滞环控制器,输出的开关状态不仅仅由电流输入偏差决定,还与当前的开关状态有关.如图5所示,电流滞环控制的输入是给定电流与重构电流的偏差,输出是对下一采样周期开关状态 $\hat{S}_{abc}(k+1)$ 的预估.与传统的电流滞环调节策略不同的是,估计的 $\hat{S}_{abc}(k+1)$ 并不直接送出,而是与当前的开关状态 $S_{abc}(k)$ 一起进入开关状态数字选择器,经过逻辑判断后,产生下一采样周期的开关状态 $S_{abc}(k+1)$,用于驱动相应功率器件,为相电流重构过程提供必要的开关状态信息.

一般 $S_{abc}(k) = \hat{S}_{abc}(k+1)$.但是,用重构电流作电流反馈信号时,可能会出现开关状态在同一相上的两个功率器件之间长时间重复更新的异常情况,造成其它二相电流重构误差越来越大.对于这种情况,图5中设计的开关状态数字选择器能自动识别,同时强迫启动新的开关模式,表2详细描述了新开关模式的确定原则.此外,电流重构过程中,因每次仅有一相电流被更新,其它二相重构电流与其给定值的偏差可能相等,数字电流滞环控制器输出“0(000)”或“7(111)”的无效开关状态,逆变器上(或下)桥臂的所有功率器件开通, i_{dc} 为0,此时 i_{dc} 不能反映相电流的任何有效信息,这种状态在电流重构过程中应避免出现.为此,在开关状态数字选择器

中,设计了如下开关状态控制逻辑,目的是变更引起无效开关状态的现有开关模式,进行其它相上的电流更新,以避免重构误差的进一步扩大.

$$\begin{aligned}
 &\text{If } \hat{S}_{abc}(k+1) = 0,7 \text{ Then} \\
 &\quad S_{abc}(k+1) = S_{abc}(k) + 2 \\
 &\text{If } S_{abc}(k+1) > 6 \text{ Then} \\
 &\quad S_{abc}(k+1) = S_{abc}(k+1) - 6 \\
 &\text{End if} \\
 &\text{End if}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

表 2 异常情况下的开关状态选择

Tab. 2 Switching state selection when state is out of the way

$S_{abc}(k)$	$S_{abc}(k+1)$	
1(001)	$err_b > err_c$	5(101)
	$err_b \leq err_c$	3(011)
2(010)	$err_c > err_a$	3(011)
	$err_c \leq err_a$	6(110)
3(011)	$err_b > err_a$	2(010)
	$err_b \leq err_a$	1(001)
4(100)	$err_b > err_a$	5(101)
	$err_b \leq err_a$	6(110)
5(101)	$err_c > err_a$	4(100)
	$err_c \leq err_a$	1(001)
6(110)	$err_b > err_c$	2(010)
	$err_b \leq err_c$	4(100)

表中, $err_x = |i_{xs}^* - i_{xs-re}|$, “x”表示定子电流所在的相, “s”表示定子, “re”表示重构.

4 仿真结果及分析 (Simulation results and analysis)

仿真用的电机参数为: $R_s = 0.434\Omega$, $L_{ls} = 2\text{mH}$, $R_r = 0.816\Omega$, $L_{lr} = 2\text{mH}$, $L_m = 69.31\text{mH}$, $J = 2\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $p = 2$. 本文以感应电机矢量控制系统为例,用 Matlab/Simulink 仿真软件对设计的相电流重构策略进行了仿真研究. 在建模中,使用了一种面向控制系统电气原理结构图、利用 Power System 工具箱进行系统建模仿新的方法,这种方法的最大的特点是直观,接近系统的实际物理模型,能较真实地反映实际系统运行状态. 其中,对较复杂的、具有特殊功能的相电流重构环节和数字电流滞环控制器,本文是通过编写 S 函数,创建相应模型模块的. 利用 Simulink 中

的 FDAtool 数字滤波器技术,设计了一个 2 阶的 IIR 数字滤波器.

图 6 ~ 图 17 为电机从空载起至低速、中速及高速三种情况下的实测电流及重构电流波形. 图 6、10、14 表明,设计的数字电流滞环控制保留了模拟电流滞环控制的良好特性,负载电机定子绕组的电流波形为正弦波. 图 9、13、17 仿真曲线显示,重构电流与实测电流误差较小,电流重构精度高. 对比图 7 与图 8、图 11 与图 12、图 15 与图 16,易见 IIR 数字滤波器的合理设置,削弱了电磁噪声及相电流更新过程中的估计误差对重构过程的影响,极大地改善了重构电流的质量.

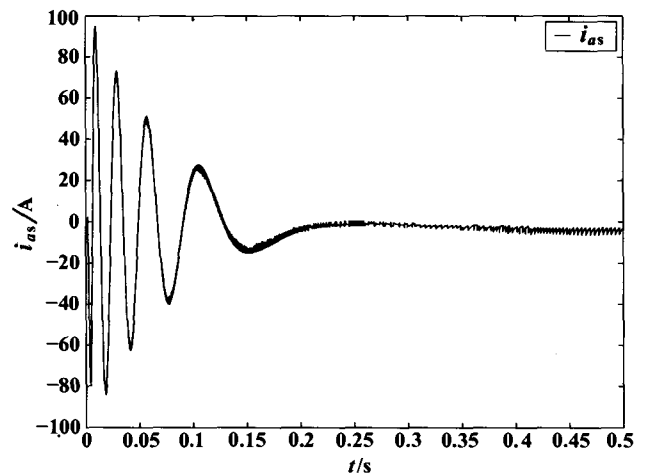


图 6 A 相的实测电流 ($n = 20\text{r/min}$)
Fig. 6 A phase actual current ($n = 20\text{r/min}$)

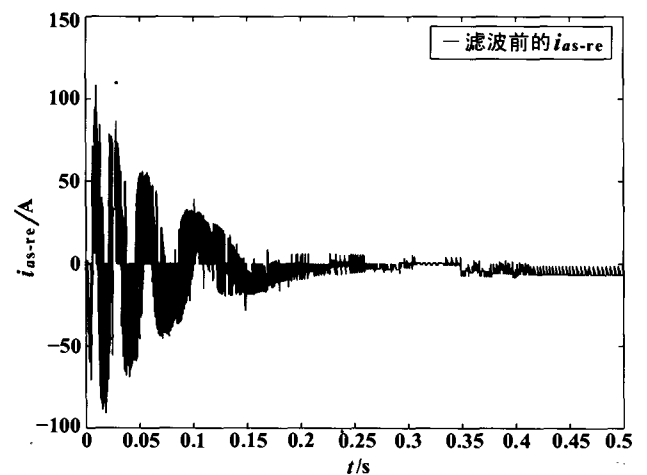


图 7 A 相滤波前的重构电流 ($n = 20\text{r/min}$)
Fig. 7 A phase reconstruction current before filtering ($n = 20\text{r/min}$)

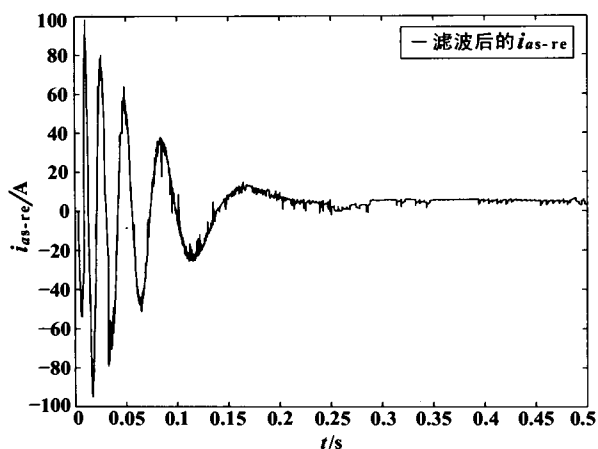


图 8 A 相滤波后的重构电流 ($n = 20\text{r/min}$)

Fig. 8 A phase reconstruction current after filtering ($n = 20\text{r/min}$)

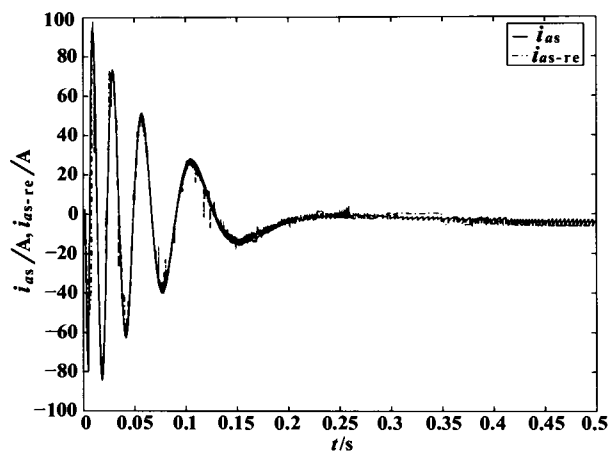


图 9 A 相的实测电流与精确重构电流 ($n = 20\text{r/min}$)

Fig. 9 A phase actual current and accurate reconstruction current ($n = 20\text{r/min}$)

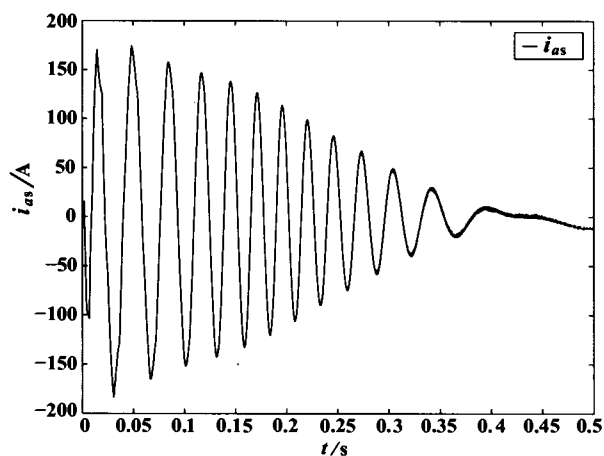


图 10 A 相的实测电流 ($n = 300\text{r/min}$)

Fig. 10 A phase actual current ($n = 300\text{r/min}$)

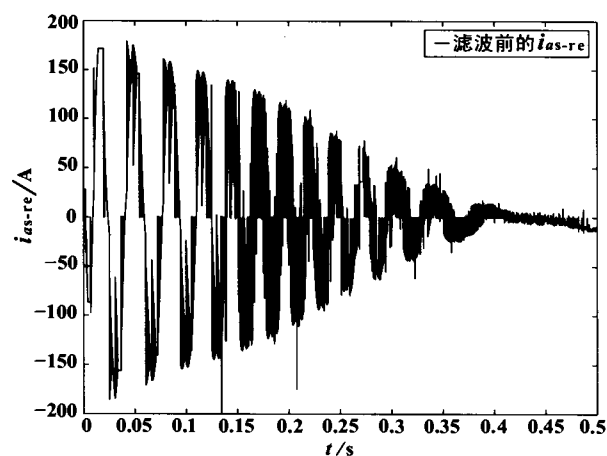


图 11 A 相滤波前的重构电流 ($n = 300\text{r/min}$)

Fig. 11 A phase reconstruction current before filtering ($n = 300\text{r/min}$)

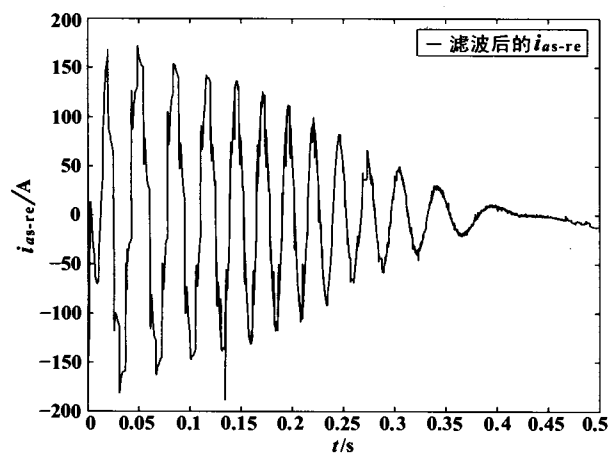


图 12 A 相滤波后的重构电流 ($n = 300\text{r/min}$)

Fig. 12 A phase reconstruction current after filtering ($n = 300\text{r/min}$)

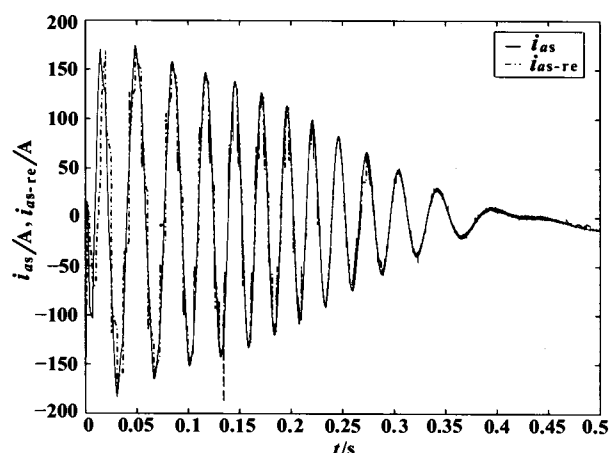
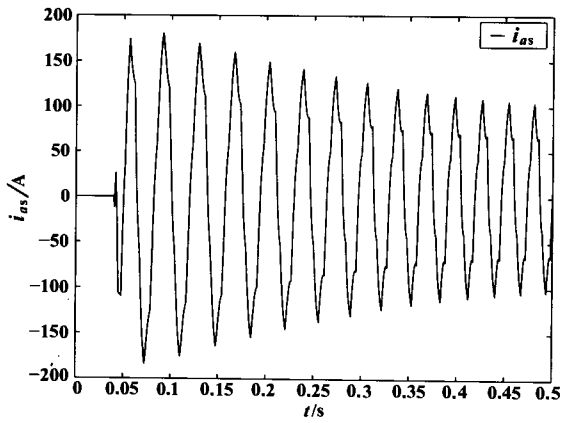
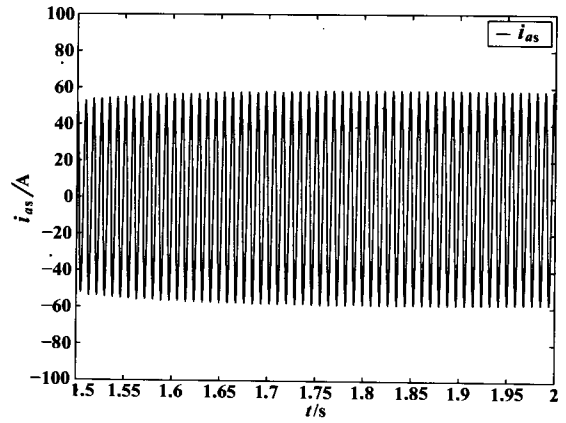


图 13 A 相的实测电流与精确重构电流 ($n = 300\text{r/min}$)

Fig. 13 A phase actual current and accurate reconstruction current ($n = 300\text{r/min}$)

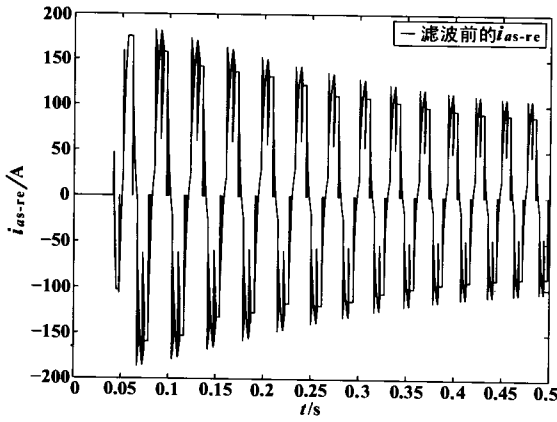


(a)

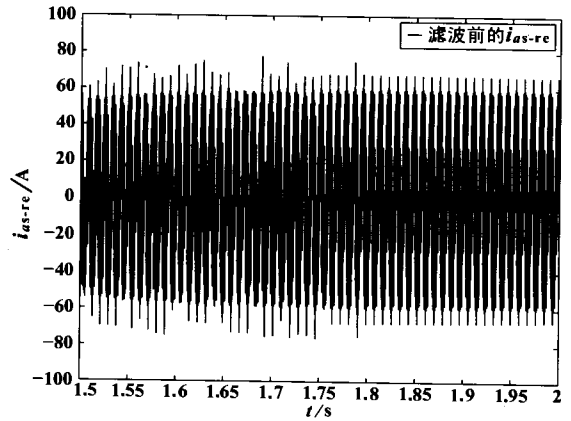


(b)

图 14 A 相的实测电流 ($n = 1000\text{r/min}$)
Fig. 14 A phase actual current ($n = 1000\text{r/min}$)

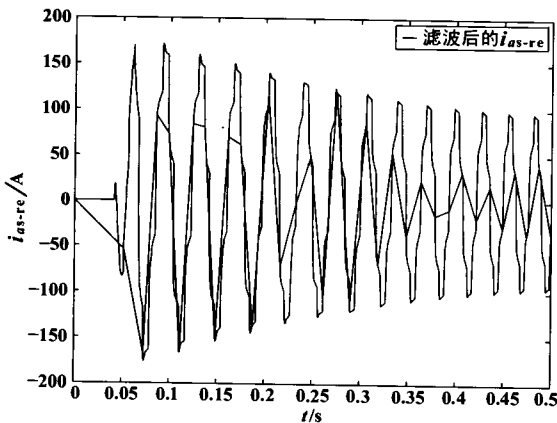


(a)

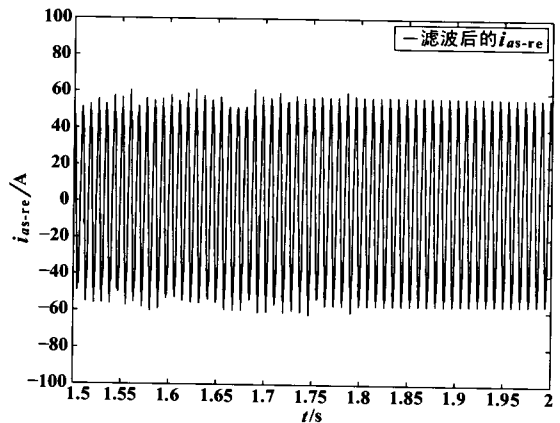


(b)

图 15 A 相滤波前的重构电流 ($n = 1000\text{r/min}$)
Fig. 15 A phase reconstruction current before filtering ($n = 1000\text{r/min}$)

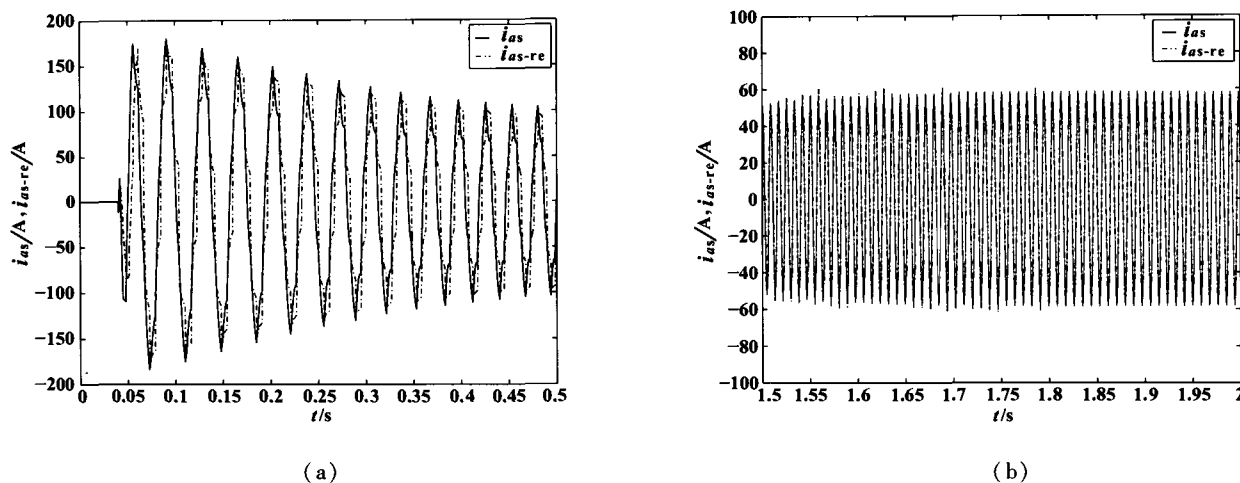


(a)



(b)

图 16 A 相滤波后的重构电流 ($n = 1000\text{r/min}$)
Fig. 16 A phase reconstruction current after filtering ($n = 1000\text{r/min}$)

图 17 A 相的实际电流与精确重构电流 ($n = 1000\text{r/min}$)Fig. 17 A phase actual current and accurate reconstruction current ($n = 1000\text{r/min}$)

5 结论 (Conclusion)

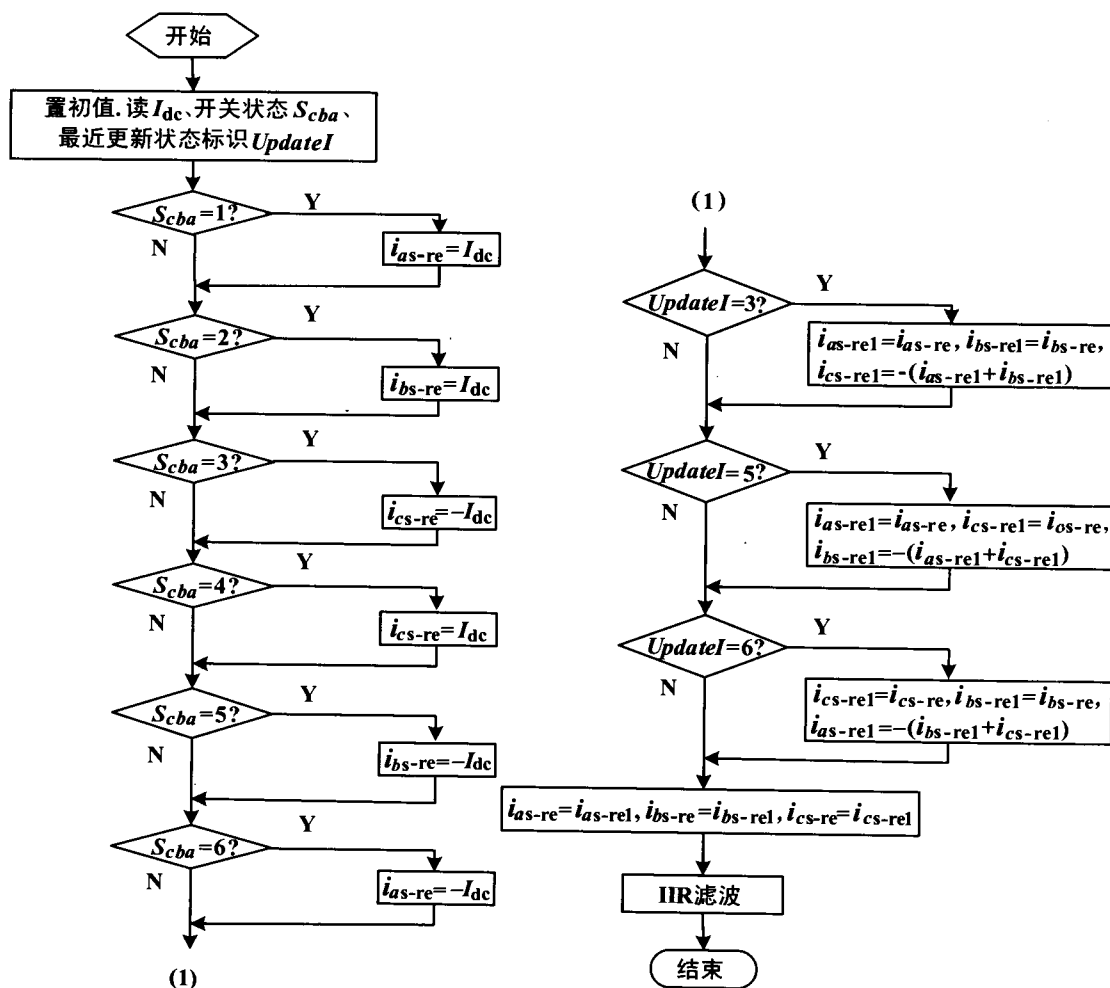
针对三相电压源型 PWM 逆变器相电流的重构问题进行了研究分析,提出了基于直流电流传感器和开关状态重构逆变器相电流的新方法.用最近更新的二相电流计算第三相电流的新思路,解决了二极管续流期间相电流的预测估计问题,减少了重构估计误差,改善了重构电流的波形质量.数字滤波器 IIR 的使用,消除了噪声对重构电流波形的影响.改进的数字电流滞环控制器避开了无效开关状态对电流重构过程的影响.以感应电机矢量控制系统为例,对不同速度下电流的重构过程进行了仿真研究,仿真结果证明所提方法是有效的、准确的.该方法简单,不涉及较复杂的运算,易于工程实现,与驱动系统的负载及模型参数无关,可在任何三相平衡电流的交流电机驱动系统中应用.同时,它也是降低系统成本、提高系统可靠性及电流容错能力的有效措施.

参 考 文 献 (References)

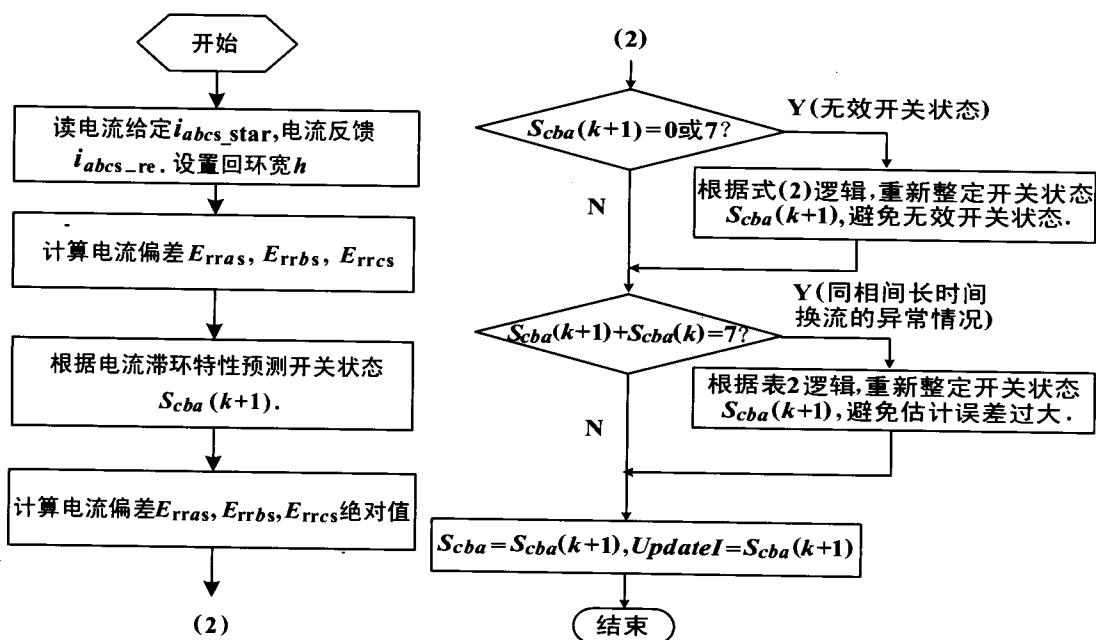
- [1] Green T C, Williams B W. Derivation of motor line-current waveforms from the DC-link current of an inverter [J]. IEE Proceedings, Part B: Electric Power Applications, 1989, 136(4): 196 ~ 204.
- [2] Petruzzello F, Joos G, Ziogas P D. Some implementation aspects of line current reconstruction in three phase PWM inverters [A]. Proceedings of the 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society [C]. Los Alamitos, CA, USA; IEEE, 1990. 1149 ~ 1154.
- [3] Blaabjerg F, Pedersen J K, Jaeger U, et al. Single current sensor technique in the DC link of three-phase PWM-VS inverters: A review and a novel solution [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(5): 1241 ~ 1253.
- [4] Kim H, Jahns T M. Current control for AC motor drives using a single DC link current sensor and measurement voltage vectors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 46(6): 1539 ~ 1547.
- [5] Wolbank T M, Macheiner P. An improved observer-based current controller for inverter fed AC machines with single DC-link current measurement [A]. Proceedings of the 2002 IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2002. 1003 ~ 1008.
- [6] Chakrabati S, Jahns T M, Lorenz R D. A current reconstruction algorithm for three-phase inverters using integrated current sensors in the low-side switches [A]. Proceedings of the 2003 IEEE Industry Applications Conference; 38th IAS Annual Meeting; Crossroads to Innovation [C]. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2003. 925 ~ 932.

附录 (Appendix)

1. 相电流重构算法流程图 (Algorithm structure of the phase currents reconstruction)
2. 开关状态生成器算法流程图 (Algorithm structure of the switching state generator)



附图 1



附图 2

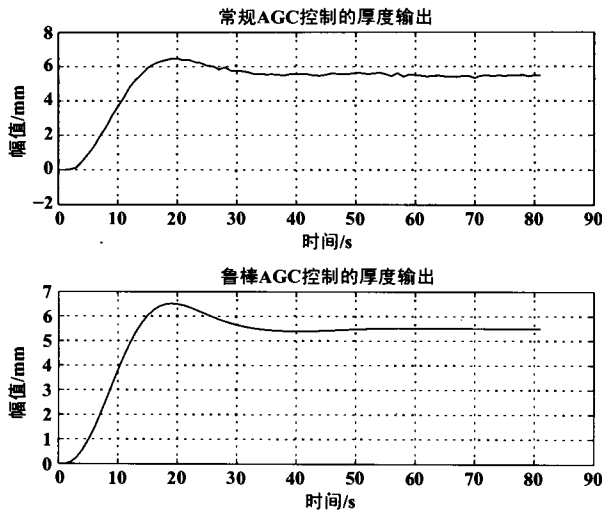


图6 常规AGC控制与鲁棒AGC控制输出比较

Fig.6 Comparison of output between robust AGC control and conventional AGC control

证鲁棒稳定性又能保证鲁棒性能. 仿真结果表明, 基于 H_2 约束的 H_∞ 控制可以把多目标控制问题转换为多变量约束下的单目标控制, 所提控制策略是可行、有效的.

参 考 文 献 (References)

- [1] Okada M, Murayama K, Urano A, *et al.* Optimal control system for hot strip finishing mill [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(8): 1029 ~ 1034.
- [2] Hearn G, Grimble M J. Robust multivariable control for hot strip

mills [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(10): 995 ~ 1002.

- [3] Grimble M J, Hearn G. LQG controllers for state-space systems with pure transport delays: Application to hot strip mills [J]. *Automatica*, 1998, 34(10): 1169 ~ 1184.
- [4] Asano K, Yamamoto K, Kawase T, *et al.* Hot strip mill tension-looper control based on decentralization and coordination [J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(3): 337 ~ 344.
- [5] 葛平, 栾晓冬, 李晓凌, 等. 基于 H_∞ 鲁棒控制方法的 AGC——活套综合控制 [J]. *北京科技大学学报*, 2001, 23(6): 557 ~ 559.
- [6] 王莉, 王粉花, 孙一康. 基于 LMI 方法的板形板厚综合系统的 H_∞ 跟踪控制器设计 [J]. *计算机仿真*, 2004, 21(2): 78 ~ 81, 156, 157.
- [7] 傅剑, 杨卫东, 李伯群. 基于 LMI 的 H_∞ 解耦及活套高度张力控制 [J]. *控制与决策*, 2005, 20(8): 883 ~ 886, 891.
- [8] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [9] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] Nonami K, Sivrioglu S. Active vibration control using LMI-based mixed H_2/H_∞ state and output feedback control with nonlinearity [A]. *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996. 161 ~ 166.

作者简介

杨斌虎(1971-), 男, 博士生. 研究领域为自适应鲁棒控制.

杨卫东(1952-), 男, 硕士, 教授, 博士生导师. 研究领域为轧制控制.

陈连贵(1970-), 男, 博士生. 研究领域为为非线性控制.

(上接第 513 页)

作者简介

刘 艳(1967-), 女, 博士生. 研究领域为复杂系统的建模, 故障检测与容错控制.

邵 诚(1958-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为复杂系统的建模与控制, 自适应控制, 鲁棒控制.