

电流型逆变器离散滑模控制技术研究

余勇

(合肥阳光电源有限公司, 安徽省 合肥 230088)

摘要: 以电流型逆变器为研究对象, 在建立了离散数学模型的基础上讨论了一种滑模控制策略。在滑模控制作用下, 该系统对负载扰动具有较强的鲁棒性和良好的电流控制性能。通过 DSP 构建试验平台, 验证了该控制方案的有效性。

关键词: 逆变器; 滑模控制; 离散

中图分类号: TM46 文献标识码: A

Discrete sliding mode control for current-source inverter

Yu Yong

Sungrow Power Supply Co., Ltd, Hefei 230088, Anhui Province, China

Abstract: In this paper, the discrete mathematical model of current source inverter is analyzed and a sliding mode control(SMC) proposed. With the SMC, the controlled system is robust to load disturbance, and possesses good system performance. Experiment based on DSP is performed, and the results show the effective of the system designing.

Keywords: inverter; sliding mode control; discrete

1 引言

滑模控制(Sliding Mode Control)最早由前苏联 Emelyanov 在 1960 年提出^{[16]-[18]}, 并引起了广大学者的关注。滑模控制之所以逐渐受到重视, 主要在于它的鲁棒性, 即当系统处于滑动状态时, 误差动态响应可以确定, 系统动态特性对参数变化及噪声干扰很不灵敏。另外, 动态响应快也是滑模控制的突出优点。对于电力电子变流装置, 如 PWM 逆变器等, 由于本身的变结构及可能的参数时变特性, 采用滑模控制可望取得良好的动态性能。国内外学者在 20 世纪 80 年代就开始了这方面的研究^{[1]-[5]}。

电流型逆变器(CSI)具有很多优点: 主电路简单; 便于实现再生制动和四象限运行; 限流能力强, 短路保护可靠性高; 适用于中、大容量的相量控制, 用于电力拖动时能在宽范围内精确控制转矩和速度等。因此, 电流型逆变器为交流调速技术开拓了许多应用领

域。

2 电流型逆变器离散模型

带感性负载的单相 CSI 电路如 1 图所示:

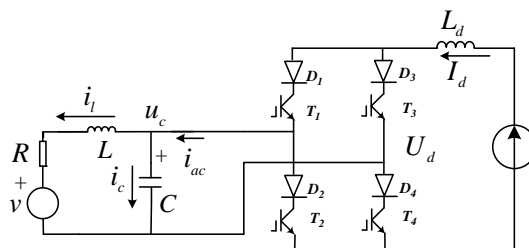


图 1 带非线性负载的单相 CSI

在电流型逆变器中, 非线性负载可以统一等效为一个时变的反电动势 v 。其控制目标就是当 v 在一定的范围之内随意的变化时, 依然保证通过其中的电流 i_l 跟踪参考指令, 这就对单相 CSI 负载电流控制提出了较高的要求。

CSI PWM 开关函数 p 描述, 即

$$p = \begin{cases} 1 & T_1、T_4 \text{导通} \\ -1 & T_2、T_3 \text{导通} \end{cases} \quad (1)$$

CSI 交流侧电流 i_{ac} 可表示为:

$$i_{ac} = I_d p \quad (2)$$

设交流侧滤波电容 C 端电压为 u_c , 则其直流侧电压 U_d 可表示为:

$$U_d = u_c p \quad (3)$$

可以看出, CSI 交流侧相当于受控电流源而直流侧相当于受控电压源。

建立系统状态方程:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \frac{di_l}{dt} \\ \frac{du_c}{dt} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_l \\ u_c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{1}{C} \end{vmatrix} i_{ac} + \begin{vmatrix} -1 \\ 0 \end{vmatrix} v \\ &= A \begin{vmatrix} i_l \\ u_c \end{vmatrix} + B i_{ac} + F v \end{aligned} \quad (4)$$

首先做必要的假设, 对于含扰动的 CSI 系统, 其电压扰动是有界的, 即 $|v| < v_{\max}$ 、

$$\begin{vmatrix} \dot{v} \\ v \end{vmatrix} < \dot{v}_{\max}。$$

设采样周期为 T , 由式(4)可得系统离散化数学模型:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} i_l(k+1) \\ u_c(k+1) \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_l(k) \\ u_c(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r_1 \\ r_2 \end{vmatrix} i_{ac}(k) \\ + \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \end{vmatrix} v(k) &= A_d \begin{vmatrix} i_l(k) \\ u_c(k) \end{vmatrix} + B_d i_{ac}(k) + F_d v(k) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_d &= e^{AT} \\ B_d &= \left(\int_0^T e^{As} ds \right) B \\ F_d &= \left(\int_0^T e^{As} ds \right) F \end{aligned}$$

3 CSI 的滑模控制

设 CSI 期望控制量 $i_{ac} = i_{acf} + i_{acs}$ (其中 i_{acf} 控制量; i_{acs} 为滑模控制量) 时, 在不考虑扰动 v 的条件下:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} i_l^*(k+1) \\ u_c^*(k+1) \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_l^*(k) \\ u_c^*(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r_1 \\ r_2 \end{vmatrix} i_{acf}(k) \\ &= A_d \begin{vmatrix} i_l^*(k) \\ u_c^*(k) \end{vmatrix} + B_d i_{acf}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

可得:

$$\begin{aligned} i_{acf}(k) &= \frac{1}{r_1} [i_l^*(k+1) - (\phi_{11} + \phi_{22})i_l^*(k) \\ &\quad - (\phi_{12}\phi_{21} - \phi_{11}\phi_{22})i_l^*(k-1) \\ &\quad - (\phi_{12}r_2 - \phi_{22}r_1)i_{acf}(k-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

(5)–(6):

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} e_1(k+1) \\ e_2(k+1) \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r_1 \\ r_2 \end{vmatrix} i_{acs}(k) \\ + \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \end{vmatrix} v(k) & \end{aligned} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} e_1(k+1) &= i_l(k+1) - i_l^*(k+1) \\ e_2(k+1) &= u_c(k+1) - u_c^*(k+1) \end{aligned}$$

$$\text{设 } Z(k) = \begin{vmatrix} e_1(k) \\ e_1(k) - e_1(k-1) \end{vmatrix}$$

则:

$$\begin{aligned} Z(k+1) &= \begin{vmatrix} e_1(k+1) \\ e_1(k+1) - e_1(k) \end{vmatrix} \\ &= \Phi_x Z(k) + b_x [i_x(k) + d(k)] \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \begin{vmatrix} \phi_{12}\phi_{21} - \phi_{11}\phi_{22} + \phi_{11} + \phi_{22} & \phi_{11}\phi_{22} - \phi_{12}\phi_{21} \\ \phi_{12}\phi_{21} - \phi_{11}\phi_{22} + \phi_{11} + \phi_{22} - 1 & \phi_{11}\phi_{22} - \phi_{12}\phi_{21} \end{vmatrix} \\ b_x &= \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} \\ i_x(k) &= r_1 i_{acs}(k) + (\phi_{12}r_2 - \phi_{22}r_1) i_{acs}(k-1) \\ d(k) &= f_1 v(k) + (\phi_{12}f_2 - \phi_{22}f_1) v(k-1) \end{aligned}$$

由 i_x 可得:

$$\begin{aligned} i_{acs}(k) &= \\ &= \frac{1}{r_1} (i_x(k) - (\phi_{12}r_2 - \phi_{22}r_1) i_{acs}(k-1)) \end{aligned} \quad (10)$$

设系统滑模面:

$$s(k) = c^T Z(k) = c_1 Z_1(k) + c_2 Z_2(k) = 0 \quad (11)$$

依据高氏趋近律^{[6][7]}, 可得:

$$\begin{aligned} i_x(k) &= \frac{1}{c^T b_x} ((c^T - \Phi_x - qTc^T)Z(k) \\ &\quad - c^T d(k) - \varepsilon T \operatorname{sgn}(c^T Z(k))) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\varepsilon > 0; q > 0; 1 - qT > 0$

滑模面的选择是 VSC 中最重要的问题。构造滑模面的方法主要有两种: 按极点任意配置和按快速性能指标来选择。[8]中提出了一种较好的优化设计方法。

在考虑滑模面设置时, 可以不考虑系统扰动的影响, 即系统方程为:

$$\begin{aligned} Z(k+1) &= \begin{vmatrix} e_1(k+1) \\ e_1(k+1) - e_1(k) \end{vmatrix} \\ &= \Phi_x Z(k) + b_x i_x(k) \end{aligned} \quad (13)$$

设

$$W(k) = YZ(k) \quad (14)$$

$$\text{一般考虑选择 } Y = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

则:

$$\begin{aligned} W(k+1) &= Y\Phi_x Y^{-1}W(k) + M \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} i_x(k) \\ &= \begin{vmatrix} \hat{\phi}_{x11} & \hat{\phi}_{x12} \\ \hat{\phi}_{x21} & \hat{\phi}_{x22} \end{vmatrix} W(k) + \begin{vmatrix} 0 \\ t \end{vmatrix} i_x(k) \end{aligned} \quad (15)$$

滑模面可以转化为:

$$\begin{aligned} s(k) &= c^T Z(k) = c^T Y^{-1}W(k) \\ &= \hat{c}_1 W_1(k) + \hat{c}_2 W_2(k) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

构建目标函数:

$$J(W) = qW_1(k)^2 + rW_2(k)^2 \quad (17)$$

其中 q 、 r 为随意设置的正实数。一旦

上述目标函数达到最小值时, $s(k) = 0$ 成立。

可得^[8]:

$$W_2(k) = -nW_1(k) \quad (18)$$

其中: $n = (r + p\hat{\phi}_{x12}^2)^{-1} p\hat{\phi}_{x11}\hat{\phi}_{x12}$

p 满足离散 Riccati 等式:

$$\begin{aligned} &p\hat{\phi}_{x11}^2 - p \\ &= q - p\hat{\phi}_{x11}\hat{\phi}_{x12}(r + p\hat{\phi}_{x12}^2)^{-1} p\hat{\phi}_{x11}\hat{\phi}_{x12} \\ &= 0 \end{aligned}$$

则滑模面设置为:

$$s(k) = |n \quad 1|YZ(k) \quad (19)$$

4 仿真及试验结论

采用 MATLAB 对系统进行仿真，仿真模型如图 2 所示。电流型逆变器容量约 5KVA；开关频率 10KHz；负载电感 1.2mH、电阻扰动自 1Ω 阶越至 3Ω；最大负载电流 40A、50Hz。仿真结果见图 3。

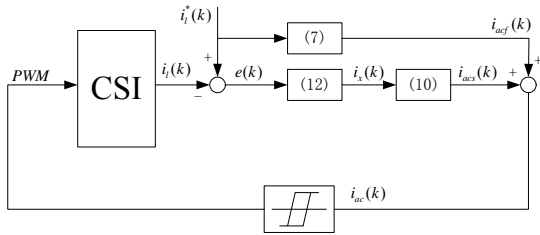
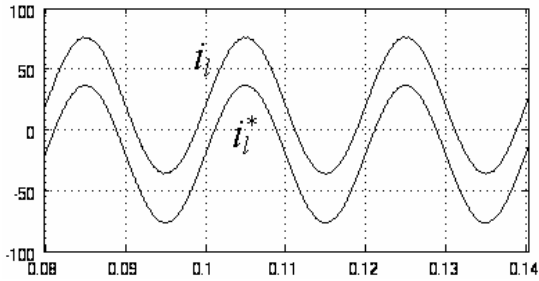
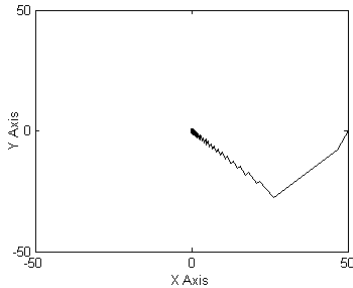


图 2 控制原理图



(a) 负载电流控制



(b) 滑模平面图

图 3 仿真结果

以 TIDSP TMS320F2406 为控制器，构建试验系统，试验结果见图 4。试验证明，所采用的滑模控制策略对负载扰动具有较强的鲁棒性，表现出良好的电流控制性能。

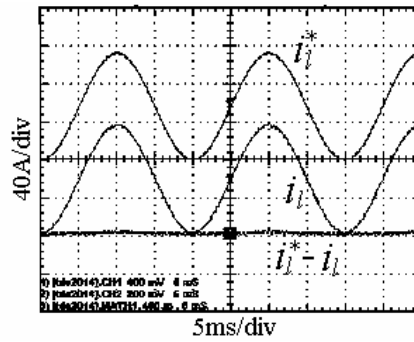


图 4 试验波形

参考文献

- [1] Fernando Silva J.; Rodrigues N.; Costa, J., "Space vector alpha-beta sliding mode current controllers for three-phase multilevel inverters." Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, Volume 1, 18-23 June 2000 Page(s):133~138 vol.1
- [2] Vazquez, N., Alvarez, J., Aguilar, C., Arau, J., "Some critical aspects in sliding mode control design for the boost inverter." Power Electronics Congress, 1998. CIEP 98. VI IEEE International 12-15 Oct. 1998 Page(s):76~81
- [3] Muthu, S., Kim, J.M.S., "Discrete-time sliding mode control for output voltage regulation of three-phase voltage source inverters." Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual Volume 1, 15-19 Feb. 1998 Page(s):129~135 vol.1
- [4] Tsang-Li Tai, Jian-Shiang Chen., "UPS inverter design using discrete-time sliding-mode control scheme." Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 49, Issue 1, Feb. 2002 Page(s):67~75
- [5] Ramos, R., Biel, D., Fossas, E., Guinjoan, F., "Control of single-phase parallel-connected

inverters: fixed-frequency quasisliding mode control approach and FPGA-based implementation.” Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual Volume 3, 15-19 June 2003 Page(s):1426~1431 vol.3

[6] 高为炳, “离散时间系统的变结构控制”, 自动化学报, Vol: 21, No.: 2, 1995

[7] Weibing Gao, Yufu Wang, Homaifa, A., “Discrete-time variable structure control systems.” Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 42, Issue 2, April 1995 Page(s):117~122

[8] F.L.Lewis. “Applied optimal control and estimation.” Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1992

余勇 男 1977年9月生 博士 主要研究方向为电力电子变流器控制等

邮编: 230009

地址: 安徽省合肥市高新区天湖路2号

合肥阳光电源有限公司

电话: 0551-5327820 13965132630

传真: 0551-5327800

Email: yuy@sps.com.cn