

# 一款 DSP 的逆变电源模糊 PID 控制

## 1、引言

由于逆变器传递函数不易得到，而且电压输出经常波动，传统的单纯 PID 控制难以达到快速和稳定的响应，而模糊控制与 PID 相结合的控制方法，通过对误差量的变化实时分析，调整 PID 参数，达到快速响应和无差跟踪，可实现逆变电源的高精度实时控制。

## 模糊控制系统原理

模糊 PID 控制器以电压偏差  $e$  和偏差变化量  $ec$  作为输入，PID 参数模糊自整定是找出 PID 三个参数与  $e$  和  $ec$  之间的模糊关系，在程序运行中通过不断检测  $e$  和  $ec$ ，根据模糊控制原理对三个参数进行在线修改，以满足不同  $e$  和  $ec$  对控制参数的不同要求，从而使被控对象有良好的动、静态性能。其在线自校正工作流程如图 1 所示。

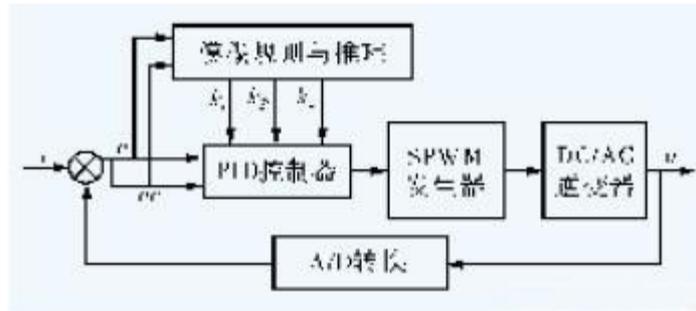


图 1 逆变电源模糊 PID 控制原理图

图中： $k_i$ 、 $k_p$ 、 $k_d$  分别为积分增益系数、比例增益系数和微分增益系数。

## 1、PID 调整控制器

图 1 中  $r$  为给定参考电压， $u$  是逆变器实际输出电压， $e$  是偏差信号， $ec$  是偏差变化率。模拟形式的 PID 控制算式为

$$u = k_p e + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e dt + k_p T_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

式中： $T_i$  为积分时间常数；

$T_d$  为微分时间常数。

本文采用 TMSLF2407 实现数字 PID 控制，对式 (1) 进行离散化，可得到式 (2) PID 控制的离散形式，为了增加系统的可靠性，采用增量式 PID 控制算式，式 (2) 为第  $k$  次 PID 控制器的输出量，减去第  $k-1$  次 PID 控制器的输出量即可得到式 (3) 增量式 PID 控制算式。

$$u(k) = k_p e(k) + \frac{k_p T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + k_p T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (2)$$

式中： $T_s$  为采样周期。

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= k_p [e(k) - e(k-1)] + \frac{k_p T_s}{T_i} e(k) + \\ &\quad k_p T_d \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T_s} \end{aligned}$$

## 2、模糊 PID 的实现

DC 馈 AC 逆变电源控制的主要是输出电压及频率的准确性。频率的准确性由 PWM 发生器决定(它是一个存贮在存储器内的一个正弦输出表格)，只要触发计算准确就能达到设计要求。负载的变化使输出电流产生变化，对于一定脉宽输出的 DC 馈 AC 电源来说，势必导致输出电压的变化。因此采用模糊控制规则根据不同的误差  $e$  和误差变化率  $ec$ ，对 PID 控制器的参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  进行在线自整定来调节输出电压。模糊控制器的输入变量是偏差绝对值  $E$ 、偏差变化率绝对值  $EC$ ，模糊控制器的输出是 PID 控制器的比例增益系数  $K_P$ 、积分增益系数  $K_I$  和微分增益系数  $K_D$ 。本文采用 CRI (Compositional Rule of Inference) 推理法设计模糊规则，为了在实时控制中避免关系矩阵的合成运算，先在脱机状态下把所有可能的输入和输出情况计算出来，形成一张控制表去执行控制，控制表是以整数形式表示的，为了产生控制表，在 CRI 推理法中把语言变量的论域转换成有限整数的论域，本质上是把连续论域离散后产生离散论域。采用式 (5) 可以将连续域离散化到整数论域  $N$ 。

$$\begin{cases} b = q(a - \frac{x_L + x_H}{2}) \\ q = \frac{2n}{x_H - x_L} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $a$  为连续论域  $X = [x_L, x_H]$  中的某个数；

$b$  是与  $a$  对应的整数论域中的某个数；

$q$  为模糊控制中对精确量进行模糊化时所用的量化因子。

本文中，各语言变量的挡数均为 4 挡(零、小、中、大)，因此取整数论域  $N$  为  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。此时，如图 2 所示，可取语言变量值 4 挡如下：

大(L)——取在 5、6 附近

中(M)——取在 3、4 附近

小(S)——取在 1、2 附近

零(Z)——取在 0 附近

在本文中利用 CRI 法推理时,控制过程是用查控制表来产生控制量的,在控制表中,模糊偏差量渣 E 渣、模糊偏差变化率渣 EC 渣, PID 控制器的模糊比例增益系数  $K_P$ 、模糊积分增益系数  $K_I$  和模糊微分增益系数  $K_D$  都是用其对应整数论域的元素来表示的。对于单个实时精确量利用式 (5),得到的结果再四舍五入,就求出了对应整数论域的相应元素,从而实现了输入量的模糊化。

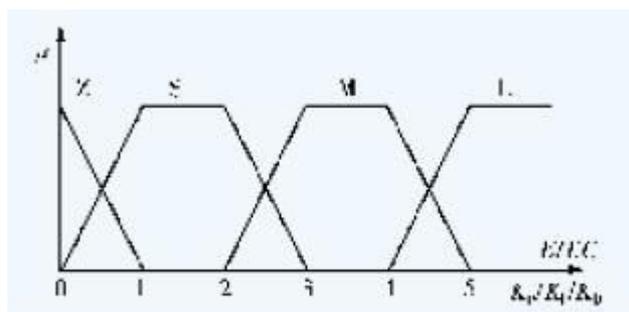


图 2 语言变量 E、EC、 $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$

针对不同的 e 和 ec,  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  的整定原则为:

1) 当渣 e 渣较大时,为使系统具有较好的跟踪性能,应取较大的  $k_p$  与较小的  $k_d$ ,同时为避免系统响应出现较大的超调,应对积分作用加以限制,通常取  $k_i=0$ 。

2) 当渣 e 渣和渣 ec 渣中等大小时,为使系统具有较小的超调,  $k_p$  应取小一些,在这种情况下,  $k_d$  的取值对系统的影响较大,应取小一些,  $k_i$  的取值要适当。

3) 当渣 e 渣较小时,为使系统具有较好的稳定性能,  $k_p$  和  $k_i$  均应取大些,同时为避免系统在设定值时出现振荡,并考虑系统抗干扰的性能,当渣 ec 渣较大时,  $k_d$  可取小些;渣 ec 渣较小时  $k_d$  可取得较大些。

根据以上整定原则和总结工程设计人员的技术知识和操作经验,建立了表 1 所列的模糊规则表。

表 1 参数整定模糊 PID 控制规则表

K <sub>P</sub> /K <sub>I</sub> /K <sub>D</sub>	EC			
	Z	S	M	L
Z	Z, L, L	L, L, M	L, L, S	M, L, S
S	L, L, M	L, L, M	L, L, S	M, M, S
M	M, Z, M	M, Z, S	M, S, S	S, S, S
L	L, Z, M	L, Z, S	L, Z, S	M, Z, S

由模糊推理得到的控制表中的控制量是一个模糊量,当整数论域  $N=[-n, +n]$ ,连续论域  $X=[x_L, x_H]$ ,可采用式(6)进行反模糊化处理。

$$\begin{cases} a=k \left[ b + \frac{n(x_L+x_H)}{x_H-x_L} \right] \\ k = \frac{x_H-x_L}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k 为模糊控制中对模糊量进行反模糊化时的比例因子。3、DSP 软件算法实现

为了保证模糊 PID 控制的实时性和准确性, DSP 在 A/D 采样的中断子程序中就调用模糊 PID 控制算法程序, 立即计算出输出控制量并送到被控对象, 根据 TMSLF2407 的性能, 机器时钟周期和中断延时可以计算出本系统从采样当前实际输出值到输出控制量大约需要 6.67 兹 s, 这对于 1ms 一次的采样来说是足够的, 完全满足实时性要求。程序流程图如图 3 所示。

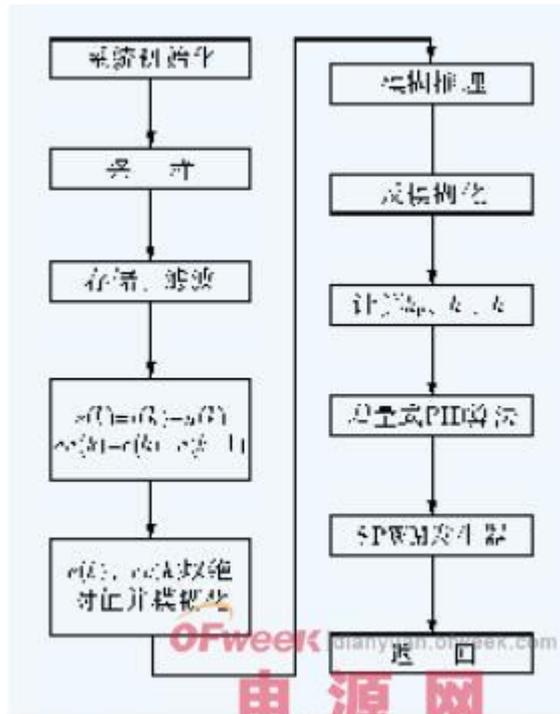


图3 DSP软件实现模糊PID控制原理图

下面是部分程序。

### 执行PID控制

PID\_Control:

SETCSXM

SETCOVM

SPM#0

LDP#4

LACLADRESULTSACLPID\_input

DALLFuzzy\_PID\_table

反模糊变化程序

Fuzzy\_PI\_end:

LTK1

MPYFuzzy\_K

PAC

SACLKp

LTk2

MPYFuzzy\_K

PAC

SACLK<sub>i</sub>

LTk3

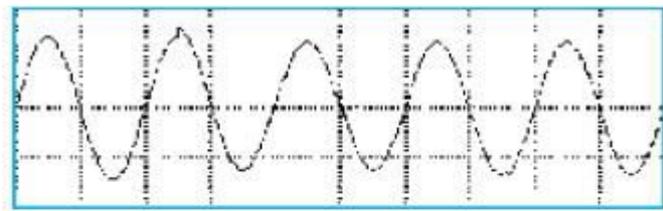
MPYFuzzy\_K

PAC

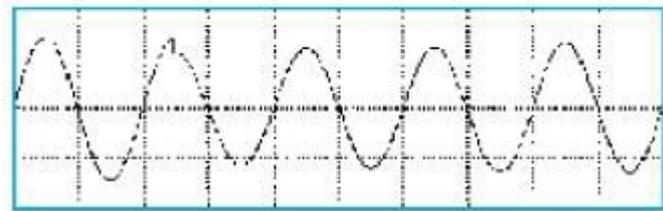
SACLK

RET

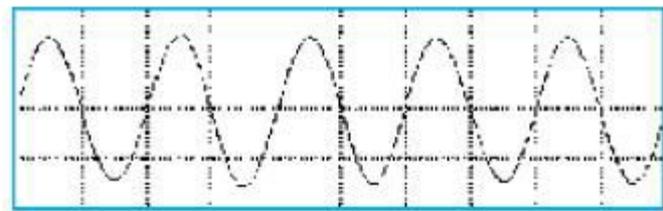
**实验结果**



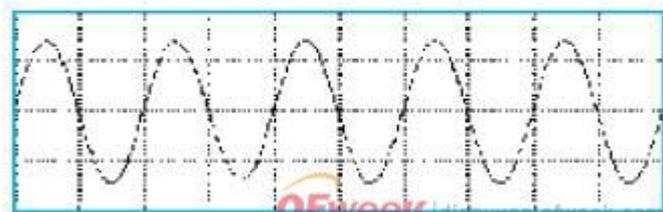
(a) PID 控制突减负载时电压波形



(b)PID 控制突加负载时电压波形



(c)模糊 PID 控制突减负载时电压波形



(d)模糊 PID 控制突加负载时电压波形

图 4 实验波形 (电压:5 V/div 时间:10 ms/div)

图 4 为实验波形，其中(a)、(b)为 PID 控制时突减负载、突加负载时的电压波形。(c)、(d)为模糊 PID 控制时突减负载、突加负载的电压波形，从实验结果可以看出采用模糊 PID 控制的方法与一般的 PID 控制方法相比具有动态响应速度快、超调小，输出稳定后其幅值变化很小，突加、减负载时电压变化幅值小的优点，因而能更有效地抑制负载突变或外界干扰对电压的影响。

1) 模糊 PID 控制器既具有模糊控制的自适应能力，又具有 PID 控制器灵活性的特点。

2) 模糊控制作为一种智能控制方法，在逆变电源电压控制应用中获得了较好的控制效果，具有控制精度高，实时性、稳态输出特性好等优点。

3) 采用 DSP 控制系统在满足逆变电源控制的要求下，具有成本低、控制灵活、可靠性高的特点。

