

Algoritmo PID

En modo estacionario, un regulador PID varía el valor de su salida para llevar a cero el error de regulación (e). El error es la diferencia entre el valor de consigna (SP) (el punto de trabajo deseado) y la variable del proceso (PV) (el punto de trabajo real). El principio de una regulación PID se basa en la ecuación que se indica a continuación y que expresa la salida M(t) como una función de un término proporcional, uno integral y uno diferencial:

Salida = término proporcional + término integral + término diferencial

$$M(t) = K_C * e + K_C \int_0^t e \, dt + M_{\text{inicial}} + K_C * de/dt$$

donde:

M(t)	es la salida del lazo en función del tiempo
K _C	es la ganancia del lazo
e	es el error de regulación (diferencia entre la consigna y la variable de proceso)
M _{inicial}	es el valor inicial de la salida del lazo

Para poder implementar esta función de regulación en un sistema digital, la función continua deberá cuantificarse mediante muestreos periódicos del valor del error, calculándose seguidamente el valor de la salida. La ecuación que constituye la base de la solución en un sistema digital es:

$$M_n = K_c * e_n + K_I * \sum_1^n + M_{\text{inicial}} + K_D * (e_n - e_{n-1})$$

Salida = término proporcional + término integral + término diferencial

donde:

M _n	es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo
K _C	es la ganancia del lazo
e _n	es el valor del error del lazo en el muestreo n-ésimo
e _{n - 1}	es el valor previo del error de regulación (en el muestreo (n-1)-ésimo)
K _I	es la constante proporcional del término integral
M _{inicial}	es el valor inicial de la salida del lazo
K _D	es la constante proporcional del término diferencial

Para esta ecuación, el término integral se muestra en función de todos los términos del error, desde el primer muestreo hasta el muestreo actual. El término diferencial es una función del muestreo actual y del muestreo previo; mientras que el término proporcional sólo es función del muestreo actual. En un sistema digital no es práctico almacenar todos los muestreos del término del error, además de no ser necesario.

Puesto que un sistema digital debe calcular el valor de salida cada vez que se muestre el error, comenzando en el primer muestreo, basta con almacenar el valor previo del error y el valor previo del término integral. Debido a la naturaleza repetitiva de la solución basada en un sistema digital, es posible simplificar la ecuación a resolver en cada muestreo. La ecuación simplificada es:

$$M_n = K_c * e_n + K_I * e_n + MX + K_D * (e_n - e_{n-1})$$

Salida = término proporcional + término integral + término diferencial

donde:

M _n	es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo
K _C	es la ganancia del lazo
e _n	es el valor del error del lazo en el muestreo n-ésimo
e _{n - 1}	es el valor previo del error de regulación (en el muestreo (n-1)-ésimo)
K _I	es la constante proporcional del término integral
MX	es el valor previo del término integral (en el muestreo (n-1)-ésimo)
K _D	es la constante proporcional del término diferencial

Para calcular el valor de salida del lazo, el S7-200 utiliza una forma modificada de la ecuación simplificada anterior. Esta ecuación modificada equivale a:

M_n	=	MP_n	+	MI_n	+	MD_n
Salida	=	término proporcional	+	término integral	+	término diferencial
<i>donde:</i>	M _n	es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-ésimo				
	MP _n	es el valor del término proporcional de salida del lazo en el muestreo n-ésimo				
	MI _n	es el valor del término integral de salida del lazo en el muestreo n-ésimo				
	MD _n	es el valor del término diferencial de salida del lazo en el muestreo n-ésimo				

Término proporcional de la ecuación PID

El término proporcional MP es el producto de la ganancia (K_C), la cual controla la sensibilidad del cálculo de la salida, y del error (e), que es la diferencia entre el valor de consigna (SP) y el valor real o de la variable del proceso (PV) para un instante de muestreo determinado. La ecuación que representa el término proporcional según la resuelve el S7-200 es la siguiente:

MP_n	=	K_C	*	(SP_n - PV_n)
<i>donde:</i>	MP _n	es el valor del término proporcional de salida del lazo en el muestreo n-ésimo		
	K _C	es la ganancia del lazo		
	SP _n	es el valor de la consigna en el muestreo n-ésimo		
	PV _n	es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo		

6

Término integral de la ecuación PID

El término integral MI es proporcional a la suma del error a lo largo del tiempo. La ecuación que representa el término integral según la resuelve el S7-200 es la siguiente:

MI_n	=	K_C	*	T_S	/	T_I	*	(SP_n - PV_n)	+	MX
<i>donde:</i>	MI _n	es el valor del término integral de salida del lazo en el muestreo n-ésimo								
	K _C	es la ganancia del lazo								
	T _S	es el tiempo de muestreo del lazo								
	T _I	es el período de integración del lazo (también llamado tiempo de acción integral)								
	SP _n	es el valor de la consigna en el muestreo n-ésimo								
	PV _n	es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo								
	MX	es el valor previo del término integral (en el muestreo (n-1)-ésimo) (también llamado suma integral o "bias")								

La suma integral o bias (MX) es la suma acumulada de todos los valores previos del término integral. Después de cada cálculo de MI_n se actualiza la suma integral con el valor de MI_n que puede ajustarse o limitarse (para más información, consulte la sección "Variables y márgenes"). Por regla general, el valor inicial de la suma integral se ajusta al valor de salida (M_{inicial}) justo antes de calcular la primera salida del lazo. El término integral incluye también varias constantes tales como la ganancia (K_C), el tiempo de muestreo (T_S), que define el intervalo con que se recalcula periódicamente el valor de salida del lazo PID, y el tiempo de acción integral (T_I), que es un tiempo utilizado para controlar la influencia del término integral en el cálculo de la salida.

Término diferencial de la ecuación PID

El término diferencial MD es proporcional a la tasa de cambio del error. El S7-200 utiliza la ecuación siguiente para el término diferencial:

$$MD_n = K_C * T_D / T_S * ((SP_n - PV_n) - (SP_{n-1} - PV_{n-1}))$$

Para evitar cambios o saltos bruscos de la salida debidos a cambios de la acción derivada o de la consigna, se ha modificado esta ecuación bajo la hipótesis de que la consigna es constante ($SP_n = SP_{n-1}$). En consecuencia, se calcula el cambio en la variable del proceso en lugar del cambio en el error, como puede verse a continuación:

$$MD_n = K_C * T_D / T_S * (SP_n - PV_n - SP_n + PV_{n-1})$$

o simplificando:

$$MD_n = K_C * T_D / T_S * (PV_{n-1} - PV_n)$$

donde:

MD _n	es el valor del término diferencial de la salida del lazo en el muestreo n-ésimo
K _C	es la ganancia del lazo
T _S	es el tiempo de muestreo del lazo
T _D	es el período de diferenciación de lazo (también llamado tiempo de acción derivada)
SP _n	es el valor de la consigna en el muestreo n-ésimo
PV _{n-1}	es el valor de la consigna en el muestreo n-1
PV _n	es el valor de la variable del proceso en el muestreo n-ésimo
PV _{n-1}	es el valor de la variable del proceso en el muestreo (n-1)-ésimo

En lugar del error es necesario guardar la variable del proceso para usarla en el próximo cálculo del término diferencial. En el instante del primer muestreo, el valor de PV_{n-1} se inicializa a un valor igual a PV_n.

Seleccionar el tipo de regulación

En numerosos sistemas de regulación basta con utilizar una o dos acciones de regulación. Así, por ejemplo, puede requerirse únicamente regulación proporcional o regulación proporcional e integral. El tipo de regulación se selecciona ajustando correspondientemente los valores de los parámetros constantes.

Por tanto, si no se desea acción integral (sin “I” en el cálculo PID), entonces el tiempo de acción integral deberá ajustarse a infinito. Incluso sin acción integral, es posible que el valor del término integral no sea “0”, debido a que la suma integral MX puede tener un valor inicial.

Si no se desea acción derivada (sin “D” en el cálculo PID), entonces el tiempo de acción derivada deberá ajustarse a 0.0.

Si no se desea acción proporcional (sin “P” en el cálculo PID) y se desea regulación I o ID, entonces la ganancia deberá ajustarse a 0.0. Puesto que la ganancia interviene en las ecuaciones para calcular los términos integral y diferencial, si se ajusta a 0.0 resulta un valor de 1.0, que es el utilizado para calcular los términos integral y diferencial.

Convertir y normalizar las entradas del lazo

El lazo tiene dos variables o magnitudes de entrada, a saber: la consigna y la variable del proceso. La consigna es generalmente un valor fijo (por ejemplo, el ajuste de velocidad en el ordenador de abordo de un automóvil). La variable del proceso es una magnitud relacionada con la salida del lazo y que mide por ello el efecto que tiene la misma sobre el sistema regulado. En el ejemplo del ordenador de abordo, la variable del proceso sería la entrada al tacómetro que es una señal proporcional a la velocidad de giro de las ruedas.

Tanto la consigna como la variable del proceso son valores físicos que pueden tener diferente magnitud, margen y unidades de ingeniería. Para que la operación PID pueda utilizar esos valores físicos, éstos deberán convertirse en representaciones normalizadas en coma flotante.

El primer paso es convertir el valor físico de un valor entero de 16 bits en un valor en coma flotante o real. La siguiente secuencia de operaciones muestra cómo convertir un valor entero en un número real.

ITD	AIW0, AC0	//Convertir un valor de entrada en una palabra doble.
DTR	AC0, AC0	//Convertir un entero doble en un número real.

El próximo paso consiste en convertir el número real representativo del valor físico en un valor normalizado entre 0.0 y 1.0. La ecuación siguiente se utiliza para normalizar tanto la consigna como el valor de la variable del proceso.

R_{Norm}	=	((R_{No norm} / Alcance) + Offset)
donde:	R _{Norm}	es la representación como número real normalizado del valor físico
	R _{No norm}	es la representación como número real no normalizado del valor físico
	Offset	vale 0,0 para valores unipolares vale 0,5 para valores bipolares
	Alcance	es la diferencia entre el máximo valor posible menos el mínimo valor posible: = 32.000 para valores unipolares (típico) = 64.000 para valores bipolares (típico)

La siguiente secuencia de operaciones muestra la forma de normalizar el valor bipolar contenido en AC0 (cuyo alcance vale 64.000), continuando la secuencia previa:

/R	64000.0, AC0	// Normalizar el valor en el acumulador.
+R	0,5, AC0	// Desplazar el valor al rango entre 0.0 y 1.0.
MOVR	AC0, VD100	// Almacenar el valor normalizado en la tabla del lazo.

Convertir la salida del lazo en un valor entero escalado

La salida del lazo constituye la variable manipulada; en el caso del automóvil, la posición de la mariposa en el carburador. La salida del lazo es un valor real normalizado comprendido entre 0.0 y 1.0. Antes de que la salida del lazo pueda utilizarse para excitar una salida analógica, deberá convertirse en un valor escalado de 16 bits. Esta operación constituye el proceso inverso de convertir PV y SP en un valor normalizado. El primer paso es convertir la salida del lazo en un valor real escalado usando la fórmula siguiente:

R_{Scal}	=	(M_n - Offset)	*	Alcance
donde:	R _{Scal}	es el valor real escalado de la salida del lazo		
	M _n	es el valor real normalizado de la salida del lazo		
	Offset	vale 0,0 para valores unipolares vale 0,5 para valores bipolares		
	Alcance	es la diferencia entre el máximo valor posible menos el mínimo valor posible = 32.000 para valores unipolares (típico) = 64.000 para valores bipolares (típico)		

La siguiente secuencia de operaciones muestra la forma de escalar la salida del lazo:

```
MOVVR VD108, AC0 //Transferir la salida del lazo al acumulador.
-R 0,5, AC0 //Incluir esta operación sólo si el valor es bipolar.
*R 64000,0, AC0 //Escalar el valor en el acumulador.
```

Seguidamente es necesario convertir el valor real escalado representativo de la salida del lazo en un entero de 16 bits. La secuencia siguiente muestra cómo efectuar esta conversión:

```
ROUND AC0, AC0 //Convertir el número real en un entero doble.
DTI AC0, LW0 //Convertir el valor en un entero de 16 bits.
MOVW LW0, AQW0 //Escribir el valor en la salida analógica.
```

Lazos con acción positiva o negativa

El lazo tiene acción positiva si la ganancia es positiva y acción negativa si la ganancia es negativa. (En regulación I o ID, donde la ganancia vale 0.0, si se indica un valor positivo para el tiempo de acción integral y derivada resulta un lazo de acción positiva y de acción negativa al indicarse valores negativos).

Variables y rangos

La variable del proceso y la consigna son magnitudes de entrada para el cálculo PID. Por tanto, la operación PID lee los campos definidos para estas variables en la tabla del lazo, pero no los modifica.

El valor de salida se genera al realizar el cálculo PID. Debido a ello, el campo en la tabla del lazo que contiene el valor de salida se actualiza cada vez que se termina un cálculo PID. El valor de salida está limitado entre 0.0 y 1.0. El usuario puede utilizar el campo de valor de salida en calidad de campo de entrada para indicar un valor de salida inicial cuando se conmute de control manual a automático (consulte también la sección "Modos").

Si se utiliza regulación integral, la suma integral es actualizada por el cálculo PID y el valor actualizado se utiliza como entrada para el siguiente cálculo PID. Si el valor de salida calculado se sale de rango (salida inferior a 0.0 o superior a 1.0), la suma integral se ajustará conforme a las fórmulas siguientes:

MX	=	1.0	-	(MP_n + MD_n)	<i>si la salida calculada, M_n > 1.0</i>
o bien,					
MX	=	- (MP_n + MD_n)			<i>si la salida calculada, M_n < 0.0</i>
donde:	MX	es el valor de la suma integral ajustada			
	MP _n	es el valor del término proporcional de salida del lazo en el muestreo n-ésimo			
	MD _n	es el valor del término diferencial de la salida del lazo en el muestreo n-ésimo			
	M _n	es el valor de la salida del lazo en el muestreo n-ésimo			

Si la suma integral se calcula de la forma descrita, mejorará la respuesta del sistema cuando la salida calculada retorne al rango adecuado. Es decir, la suma integral calculada se limita entre 0.0 y 1.0 y luego se escribe en el campo reservado para ella en la tabla del lazo cada vez que se finaliza un cálculo PID. El valor almacenado en la tabla del lazo se utiliza para el próximo cálculo PID.

A fin de evitar problemas con valores de la suma integral en determinadas aplicaciones, el usuario puede modificar el valor de la suma integral en la tabla del lazo antes de ejecutar la operación PID. Cualquier modificación manual de la suma integral deberá realizarse con gran precaución. En todo caso, el valor de la suma integral escrito en la tabla del lazo deberá ser un número real comprendido entre 0,0 y 1,0.

En la tabla del lazo se mantiene un valor de comparación de la variable del proceso para su uso en la parte de acción derivada del cálculo PID. El usuario no deberá modificar este valor.

Modos

Los lazos PID del S7-200 no incorporan el control del modo de operación. El cálculo PID sólo se ejecuta si circula corriente hacia el cuadro PID. Por ello resulta el modo “automático” cuando se ejecuta cíclicamente el cálculo PID. Resulta el modo “manual” cuando no se ejecuta el cálculo PID.

La operación PID tiene un bit de historial de circulación de corriente similar a una operación de contador. La operación utiliza este bit para detectar una transición de “0” a “1” de la circulación de la corriente. Cuando se detecta la transición, la operación ejecutará una serie de acciones a fin de asegurar un cambio sin choques entre control manual y automático. Para evitar choques en la transición al modo automático, el valor de la salida ajustado manualmente deberá entregarse en calidad de entrada a la operación PID (escrita en la entrada para M_n en la tabla del lazo) antes de conmutar a modo automático. La operación PID ejecuta las siguientes acciones con los valores de la tabla del lazo a fin de asegurar un cambio sin choques entre control manual y automático cuando se detecta una transición de la circulación de corriente de “0” a “1”:

- ☐ Ajustar la consigna (SP_n) = variable de proceso (PV_n)
- ☐ Ajustar la variable del proceso antigua (PV_{n-1}) = variable del proceso (PV_n)
- ☐ Ajustar la suma integral (MX) = valor de salida (M_n)

El estado por defecto de los bits de historial PID es “activado”. Este estado se establece en el arranque o cada vez que haya una transición de modo STOP a RUN en el sistema de automatización. Si circula corriente hacia el cuadro PID la primera vez que se ejecuta tras entrar en el modo RUN, entonces no se detectará ninguna transición de la circulación de corriente y, por consecuencia, no se ejecutarán las acciones destinadas a evitar choques en el cambio de modo.

Alarmas y operaciones especiales

La operación PID es simple, pero ofrece grandes prestaciones para ejecutar cálculos PID. Si se precisan funciones de postprocesamiento (tales como funciones de alarma o cálculos especiales en base a las variables de lazo), ello deberá implementarse utilizando las operaciones básicas soportadas por el S7-200 en cuestión.

Condiciones de error

A la hora de compilar, la CPU generará un error de compilación (error de rango) y la compilación fallará si los operandos correspondientes a la dirección inicial o al número de lazo PID en la tabla del lazo están fuera de rango.

La operación PID no comprueba si todos los valores de entrada en la tabla del lazo respetan los límites de rango. Es decir, el usuario deberá vigilar que la variable del proceso y la consigna (al igual que la suma integral y la variable del proceso previa, si se utilizan como entradas) sean números reales comprendidos entre 0.0 y 1.0.

Si se detecta algún error al ejecutar las operaciones aritméticas del cálculo PID se activará la marca SM1.1 (desbordamiento o valor no válido) y se finalizará la ejecución de la operación PID. (La actualización de los valores de salida en la tabla del lazo podría ser incompleta, por lo que se deberán descartar estos valores y corregir el valor de entrada que ha provocado el error matemático antes de volver a ejecutar la operación de regulación PID.)

Tabla de lazo

La tabla de lazo tiene 36 bytes de longitud y el formato que muestra la tabla 6-42:

Tabla 6-42 Tabla de lazo

Offset	Campo	Formato	Tipo de datos	Descripción
0	Variable del proceso (PV_n)	Palabra doble - real	IN	Contiene la variable del proceso que debe estar escalada entre 0.0 y 1.0.
4	Consigna (SP_n)	Palabra doble - real	IN	Contiene la consigna que debe estar escalada entre 0.0 y 1.0.
8	Salida (M_n)	Palabra doble - real	IN/OUT	Contiene la salida calculada, escalada entre 0.0 y 1.0.
12	Ganancia (K_C)	Palabra doble - real	IN	Contiene la ganancia, que es una constante proporcional. Puede ser un número positivo o negativo.
16	Tiempo de muestreo (T_S)	Palabra doble - real	IN	Contiene el tiempo de muestreo en segundos. Tiene que ser un número positivo.
20	Tiempo de acción integral (T_I)	Palabra doble - real	IN	Contiene el tiempo de acción integral en minutos. Tiene que ser un número positivo.
24	Tiempo de acción derivada (T_D)	Palabra doble - real	IN	Contiene el tiempo de acción derivada en minutos. Tiene que ser un número positivo.
28	Suma integral (MX)	Palabra doble - real	IN/OUT	Contiene el valor de la suma integral entre 0.0 y 1.0.
32	Variable del proceso previa (PV_{n-1})	Palabra doble - real	IN/OUT	Contiene el último valor real almacenado al ejecutar por última vez la instrucción PID.

Programa de ejemplo PID

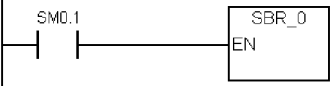
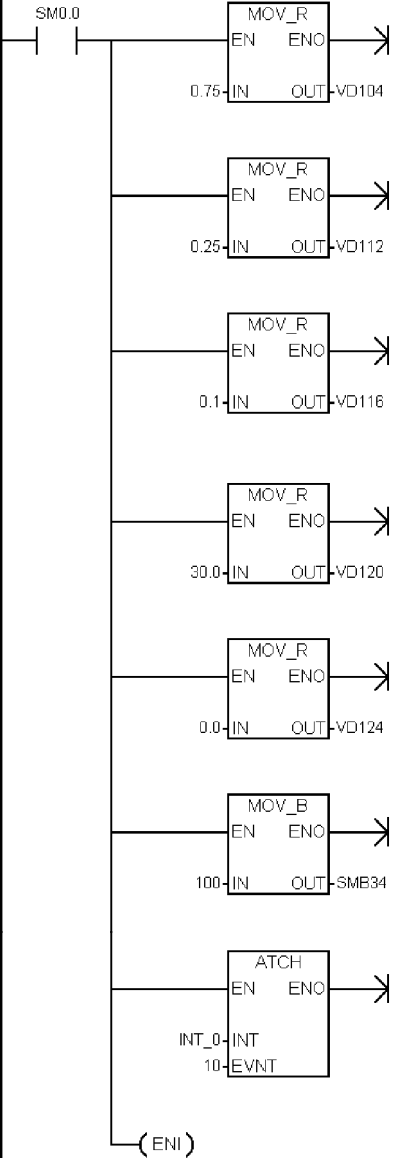
En este ejemplo se utiliza un depósito para mantener una presión de agua constante. Para ello se toma continuamente agua del depósito en una cantidad variable. Una bomba de velocidad variable se utiliza para añadir agua al depósito con un caudal apto para mantener una presión adecuada del agua y evitar así que se vacíe.

La consigna de este sistema es el nivel de agua; en este caso, un valor equivalente al 75% de llenado. La variable del proceso la suministra un sensor flotador que señala el nivel de llenado del depósito; equivale a 0 % cuando está vacío y a 100 % cuando está completamente lleno. La salida es una señal que permite controlar la velocidad de la bomba, del 0 al 100 % de su velocidad máxima.

La consigna está predeterminada y se introduce directamente en la tabla del lazo. El sensor flotador suministra la variable del proceso que es un valor analógico unipolar. La salida del lazo se escribe en una salida analógica unipolar utilizada para controlar la velocidad de la bomba. El alcance tanto de la entrada como de la salida analógica es de 32.000.

En este ejemplo sólo se utiliza acción proporcional e integral. La ganancia del lazo y las constantes de tiempo se han determinado durante cálculos de ingeniería, pudiéndose ajustar para obtener una regulación óptima. Los valores calculados de las constantes de tiempo se indican a continuación: $K_C = 0,25$, $T_S = 0,1$ segundos y $T_I = 30$ minutos.

La velocidad de la bomba se controlará de forma manual hasta que el depósito esté lleno al 75 %. Después se abre la válvula para sacar agua del mismo. Simultáneamente, la bomba cambia de modo manual a automático. La entrada digital se utiliza para conmutar de modo manual a automático. Esta entrada (I0.0) tiene control manual/automático: 0 = manual y 1 = automático. En modo manual, el operador ajusta la velocidad de la bomba en VD108 mediante un valor real que puede estar comprendido entre 0,0 y 1,0.

Ejemplo de la operación Regulación PID		
P R I N C I P A L	<p>Network 1</p> 	<p>Network 1 //En el primer ciclo, //llamar a la subrutina de inicialización.</p> <p>LD SM0.1 CALL SBR_0</p>
S B R O	<p>Network 1</p> 	<p>Network 1 //Cargar los parámetros PID y //asociar la rutina de interrupción PID: //1º Cargar la consigna del lazo = lleno al 75%. //2º Cargar la ganancia = 0,25. //3º Cargar el tiempo de muestreo = 0,1 segundos. //4º Cargar el tiempo acción integral = 30 minutos. //5º Ajustar sin acción derivada. //6º Ajustar el intervalo de tiempo (100 ms) // para la interrupción temporizada INT_0. //7º Ajustar una interrupción temporizada para // llamar a la ejecución PID. //8º Habilitar todos los eventos de interrupción.</p> <p>LD SM0.0 MOVR 0.75, VD104 MOVR 0.25, VD112 MOVR 0.1, VD116 MOVR 30.0, VD120 MOVR 0.0, VD124 MOVB 100, SMB34 ATCH INT_0, 10 ENI</p>

