

Prepráctica: Control en Cascada

Ingeniería de Sistemas y Automática

19 de marzo de 2008

1. Introducción.

El lazo típico de control se basa en la realimentación de la variable a controlar, comparando la medida de ésta con una señal de consigna o referencia, que es el valor que se desea que tome la variable controlada. En esta aproximación al problema de control sólo se tiene en cuenta la relación entre la variable de salida y la consigna, esto es, su función de transferencia. En base a esa función de transferencia se diseña un controlador apropiado siguiendo alguno de los métodos disponibles (lugar de las raíces, diseño en frecuencia, Truxal, etc.). Este esquema es válido en un gran número de aplicaciones, sin embargo en muchas de ellas la sintonización del regulador se hace complicada, y los resultados que se pueden llegar a obtener no son enteramente satisfactorios.

Debido a carencias que ofrece este tipo de realimentación tan simple, surgen otros esquemas de control que permiten mejorar el rendimiento de los sistemas, o facilitar su sintonización. Entre ellos, una opción ampliamente utilizada en la industria es el control en cascada.

2. Descripción de un control en cascada para un motor de corriente continua.

Una aplicación típica en la industria del control en cascada es el control de motores eléctricos. En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de un motor eléctrico de corriente continua controlado por el inducido; donde $u(t)$ es la tensión de alimentación del motor, $i(t)$ es la corriente por el inducido, $T_e(t)$ es el par eléctrico generado por el motor, $T_L(t)$ es un par de carga externo, $\omega(t)$ es la velocidad del motor, $\theta(t)$ es el ángulo girado por el motor, L es la inductancia del devanado inducido, R la resistencia de este devanado, J es la constante de inercia del motor, B es la constante de fricción viscosa, K_p es la constante de par y K_{bemf} es la constante de fuerza electromotriz.

El lazo de control clásico requiere un regulador dispuesto como indica la figura 2 para controlar la posición del eje del motor (ángulo girado). En esta figura, y en adelante, se indican con el superíndice “*” las variables de referencia o consigna, en negro se representan los componentes propios del sistema físico a controlar, y en azul los componentes del sistema de control. Para controlar una variable de salida de un sistema, en este caso $\theta(t)$, debemos actuar sobre variables de entrada que sea posible manipular, en el caso del motor de corriente continua la tensión de entrada $u(t)$. El control de $\theta(t)$ se verá además afectado por las perturbaciones que entran en el sistema, en este caso el par de carga $T_L(t)$. Puesto que se quiere controlar con precisión el sistema, evitando el efecto de las perturbaciones, el regulador a utilizar, podría ser un PI. La utilización de

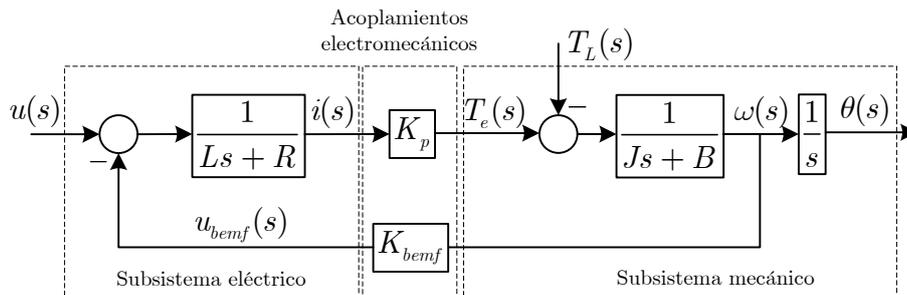


Figura 1: Diagrama de bloques del motor de corriente continua alimentado por el inducido.

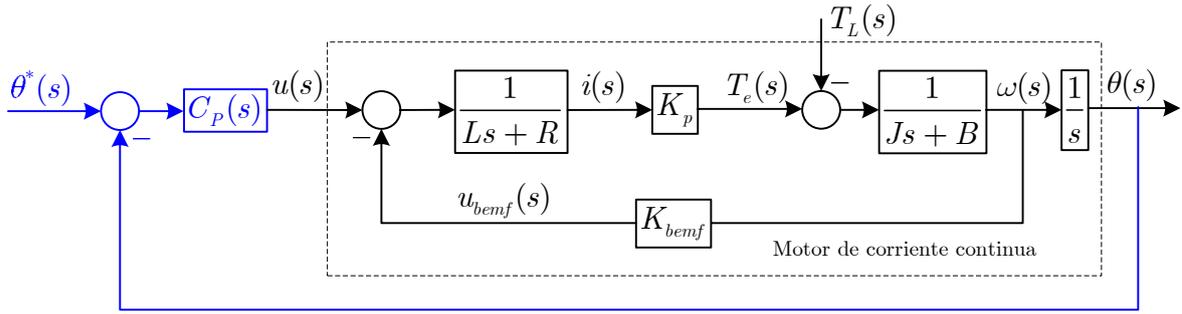


Figura 2: Control monovariante del motor de corriente continua.

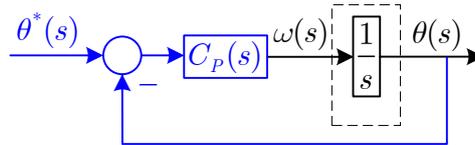


Figura 3: Control de la posición siendo la velocidad $\omega(t)$ la variable manipulada.

reguladores con acción diferencial no es aconsejable en aplicaciones con motores, debido a la presencia de ruido inherente en este tipo de sistemas, que podría llevar al mismo a la inestabilidad debido a reacciones bruscas de la acción diferencial. La sintonización de este regulador no es sencilla, y ofrece bajas prestaciones dinámicas.

Frente a esto, el esquema más utilizado para el control preciso de motores es el control en cascada. El control en cascada se puede aplicar en sistemas en que haya variables internas (variables de estado) con dinámica bien diferenciada. En el caso del motor eléctrico, el subsistema eléctrico es mucho más rápido que el subsistema mecánico, y a su vez, el comportamiento dinámico de la velocidad del rotor es superior a la de la posición de su eje. Hablar de mejor dinámica es indicativo de una mayor facilidad para variar la magnitud de una variable.

Si fuera posible manipular directamente la velocidad de giro del motor, y no sólo la tensión de entrada, el control de la posición se vuelve extremadamente sencillo, como se muestra en la figura 3. Bajo esta hipótesis el sistema a controlar es un sistema de tipo I no expuesto a perturbaciones de carga. Por tanto el diseño de $C_P(s)$ podría ser simplemente un regulador proporcional.

Si quisiéramos controlar la velocidad de giro, y pudiéramos manipular directamente el par eléctrico $T_e(t)$, el esquema de control de velocidad se reduciría al control de un sistema de primer orden, como muestra la figura 4. Puesto que el sistema a controlar es de tipo 0, será necesario un regulador PI si deseamos anular el error de posición en régimen permanente. Además este sistema se ve afectado por una perturbación de entrada, el par de carga $T_L(t)$, por lo tanto un regulador PI también es el indicado para el rechazo de este tipo de perturbaciones en régimen permanente.

En el caso de querer controlar el par eléctrico generado por el motor, el problema se traduce a controlar la corriente, pues son directamente proporcionales, con constante de proporcionalidad K_P , como puede observarse en la figura 1. Es más conveniente controlar la corriente que el par, pues los sensores de corriente son más baratos, rápidos, y fáciles de instalar que los de par. En este caso podemos manipular la tensión de entrada directamente, y por tanto la posibilidad del control sencillo de la corriente no es una hipótesis, sino

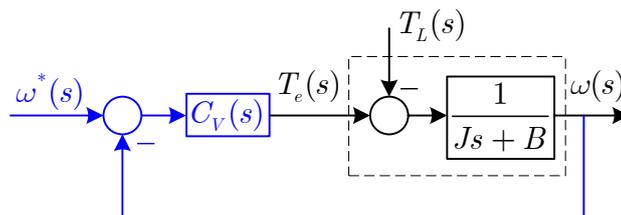


Figura 4: Control de la velocidad siendo el par eléctrico $T_e(t)$ la variable manipulada.

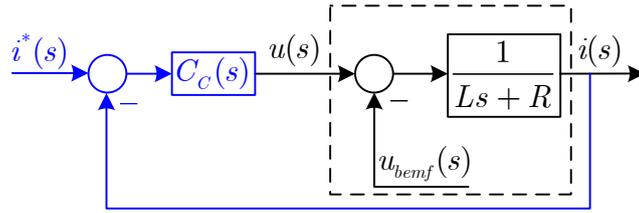


Figura 5: Control de la corriente.

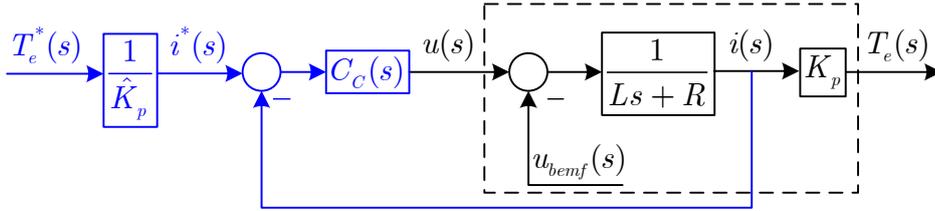


Figura 6: Control del par.

que es inmediata, como muestra en la figura 5. Al considerar de manera aislada el control de la corriente, sin tener en cuenta otras variables del motor, se puede considerar que la fuerza contraelectromotriz del motor $u_{bemf}(t)$ es una perturbación de entrada para este subsistema. Bajo estas condiciones el regulador de corriente $C_C(s)$ más adecuado es un PI, al igual que en el control de velocidad, pues este regulador anula el error de posición y elimina el efecto de las perturbaciones en régimen permanente. Como el objetivo último es controlar el par eléctrico, hay que traducir la referencia de corriente en una referencia de par, a través de la constante K_p como se puede observar en la figura 6. El símbolo “^” indica un parámetro cuyo valor es estimado.

Si sintonizamos el bucle de control de corriente (o de par) con un ancho de banda muy superior (> 4) al deseado para el control de la velocidad, podemos suponer que $T_e^*(s) \approx T_e$ desde el punto de vista del lazo de velocidad. Por tanto ya disponemos del par como variable manipulada, como muestra la figura 7 y podremos sintonizar el regulador de velocidad como se indicó anteriormente.

Asimismo, si este bucle de velocidad lo sintonizamos con un ancho de banda adecuado, por encima del ancho de banda del control de posición, podemos considerar que $\omega_e^*(s) \approx \omega_e$ desde el punto de vista del control de posición. En este caso podríamos disponer de la velocidad como variable manipulada, como muestra la figura 8.

El control en cascada consiste pues en controlar las variables más internas, para, a través de ellas poder controlar de manera sencilla las variables más externas. La figura 9 muestra esta filosofía de control. El control de posición simple se obtiene a partir de una buena regulación de velocidad, y éste, a su vez, por medio de un control adecuado del par.

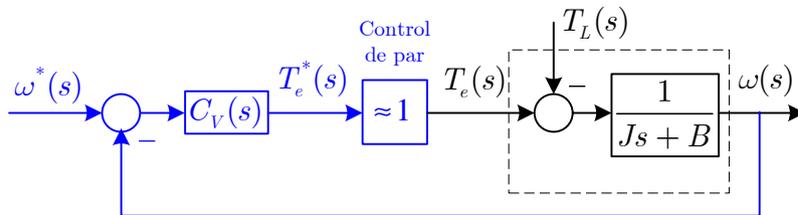


Figura 7: Control de la velocidad asumiendo control rápido y preciso de par.

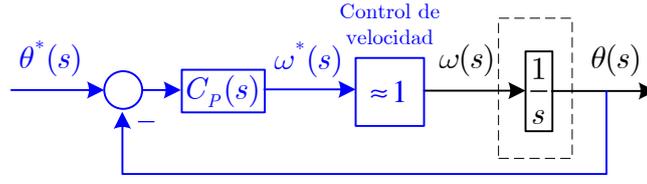


Figura 8: Control de la posición asumiendo control rápido y preciso de velocidad.

3. Sintonización de los reguladores en cascada en motores de corriente continua.

A la hora de sintonizar los tres reguladores mostrados en la figura 9 debe cumplirse que el ancho de banda de un bucle más interno esté suficientemente separado (> 4) del ancho de banda del bucle externo correspondiente. Tomando esta precaución, la sintonización de los reguladores puede hacerse por diversos métodos. En este caso se seguirá una metodología de cancelación de polos.

3.1. Sintonización del regulador de par/corriente.

El regulador de corriente, representado en las figuras 5 y 6 es, como se ha dicho, un proporcional-integral que controla un sistema de primer orden con un polo situado en $-R/L$ en cadena abierta, como puede observarse en la figura 10a. La arquitectura de este regulador proporcional-integral consta de un cero y un polo situado en el origen (1).

$$C_x(s) = K_{px} + \frac{K_{ix}}{s} = K_{px} \frac{s + K_{ix}/K_{px}}{s} \quad (1)$$

donde $x = C$ para el regulador de corriente, y $x = V$ para el regulador de velocidad.

El cero puede situarse encima del polo del sistema en cadena abierta, y el polo en cadena cerrada puede desplazarse hasta alcanzar el ancho de banda deseado para el sistema en cadena cerrada, como se puede ver en la figura 10b. En función de esto la sintonización del regulador debe hacerse como indican las ecuaciones (2) y (3).

$$K_{pC} = 2 \cdot \pi \cdot bw_C \cdot L \quad (2)$$

$$K_{iC} = \frac{R}{L} K_{pC} \quad (3)$$

donde bw_C es el ancho de banda deseado del lazo de corriente expresado en hercios (Hz).

3.2. Sintonización del regulador de velocidad.

La forma de sintonizar este regulador, representado en las figuras 4 y 7, es análoga a la del regulador de corriente. En este caso el polo del sistema está situado en $-B/J$. Las ecuaciones (4) y (5) muestran como sintonizar este regulador (1).

$$K_{pV} = 2 \cdot \pi \cdot bw_V \cdot J \quad (4)$$

$$K_{iV} = \frac{B}{J} K_{pV} \quad (5)$$

donde bw_V es el ancho de banda deseado del lazo de velocidad expresado en hercios (Hz).

3.3. Sintonización del regulador de posición

El lazo de posición controla un sistema constituido por un único integrador como puede observarse en la figura 3 y 8. En estas condiciones se elige un regulador proporcional para fijar el ancho de banda del lazo, tal como muestra la ecuación (6).

$$K_{pP} = 2 \cdot \pi \cdot bw_P \quad (6)$$

donde bw_P es el ancho de banda deseado del lazo de posición expresado en hercios (Hz).

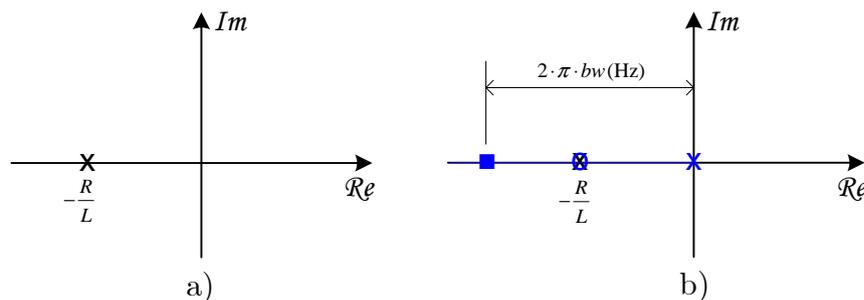


Figura 10: a) Diagrama de polos y ceros del subsistema de corriente en cadena abierta y b) Sintonización por cancelación de polos.

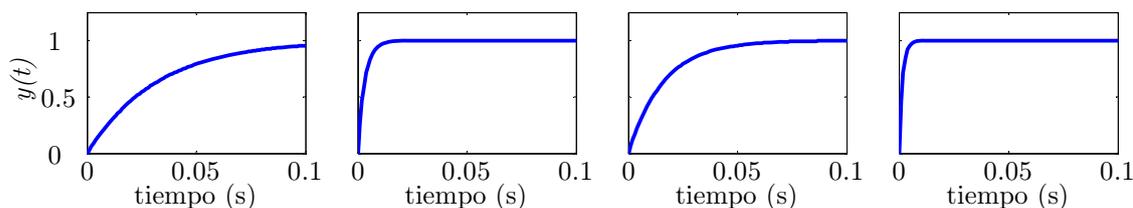


Figura 11: Respuesta de sistemas con distinto ancho de banda ante escalón unitario

4. Cuestiones

1. A lo largo del texto se habla del ancho de banda. ¿Qué es el ancho de banda? Definirlo.
2. ¿El sistema mostrado en la figura 1 es un sistema en cadena abierta o en cadena cerrada? ¿Por qué?
3. Suponiendo sistemas de primer orden y ganancia estática uno, con anchos de banda de 5Hz, 100Hz y 1000Hz, determinar cómo sería la respuesta de los mismos, en régimen permanente, ante una señal senoidal de entrada de 50Hz y de 500Hz. Dibujar cuatro ciclos de dichas señales.
4. Relacionar el ancho de banda con la respuesta temporal del sistema. En la figura 11 se muestra la respuesta de cuatro sistemas ante escalón unitario. Ordenarlas de mayor a menor ancho de banda de los sistemas que las originan.
5. Explicar cuál puede ser el origen físico de las perturbaciones de par que se han modelizado como $T_L(s)$. Exponer un par de ejemplos. ¿En qué parte del motor eléctrico se aplican estas perturbaciones?
6. Calcular los reguladores de corriente, velocidad y posición para el sistema indicado con anchos de banda de 400Hz, 20Hz y 4Hz respectivamente. ($J = 0,0271\text{m}^2$, $B = 0,00776\text{Nm}/(\text{rad/s})$, $L = 0,0068\text{H}$, $R = 1,1648\Omega$, $K_p = 0,55\text{Nm/A}$, $K_{bemf} = 0,55\text{V}/(\text{rad/s})$).
7. ¿Qué ocurriría si no se respeta una separación suficiente entre los distintos anchos de banda de los reguladores en un control en cascada? En la figura 12 se muestran las respuestas de cuatro sistemas como el descrito en el texto, controlados con reguladores en cascada sintonizados con los diferentes anchos de banda que se indican a continuación. Relacionar las respuestas con su combinación de anchos de banda correspondientes.

Combinación 1 C_p : 50Hz C_V : 50Hz C_C : 400Hz

Combinación 2 C_p : 25Hz C_V : 50Hz C_C : 400Hz

Combinación 3 C_p : 50Hz C_V : 100Hz C_C : 400Hz

Combinación 4 C_p : 25Hz C_V : 100Hz C_C : 400Hz

8. Exponer las ventajas e inconvenientes que pueden caracterizar al control en cascada frente al control con un sólo lazo de regulación.

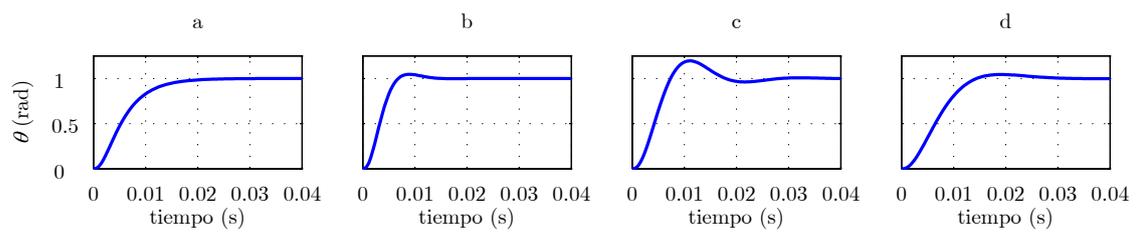


Figura 12: Respuesta del control en cascada con distintas sintonizaciones de los reguladores.