MANUAL DE ESTUDIO · MECATRÓNICA AUTOMOTRIZ

Actuadores eléctricos y electrohidráulicos: PWM y motores BLDC

Capítulo 07 · En el video: **minuto 1:30:49** · Duración 15:10

Objetivo. Elegir la etapa de potencia de un actuador y controlar la corriente de una electroválvula proporcional.

Ideas clave

Cadena de actuación

Señal de mando → etapa de potencia → convertidor de energía (motor, solenoide, piezo) → mecanismo. Los principios son el electrodinámico (fuerza de Lorentz sobre un conductor) y el electromagnético (atracción de un núcleo, tensión de Maxwell).

PWM y puente H

Conmutar a frecuencia fija y variar el ciclo de trabajo regula la tensión media con pocas pérdidas. Un interruptor de lado bajo o alto mueve en un sentido; el puente H permite invertir y frenar. El diodo de rueda libre protege al apagar una carga inductiva.

Motores

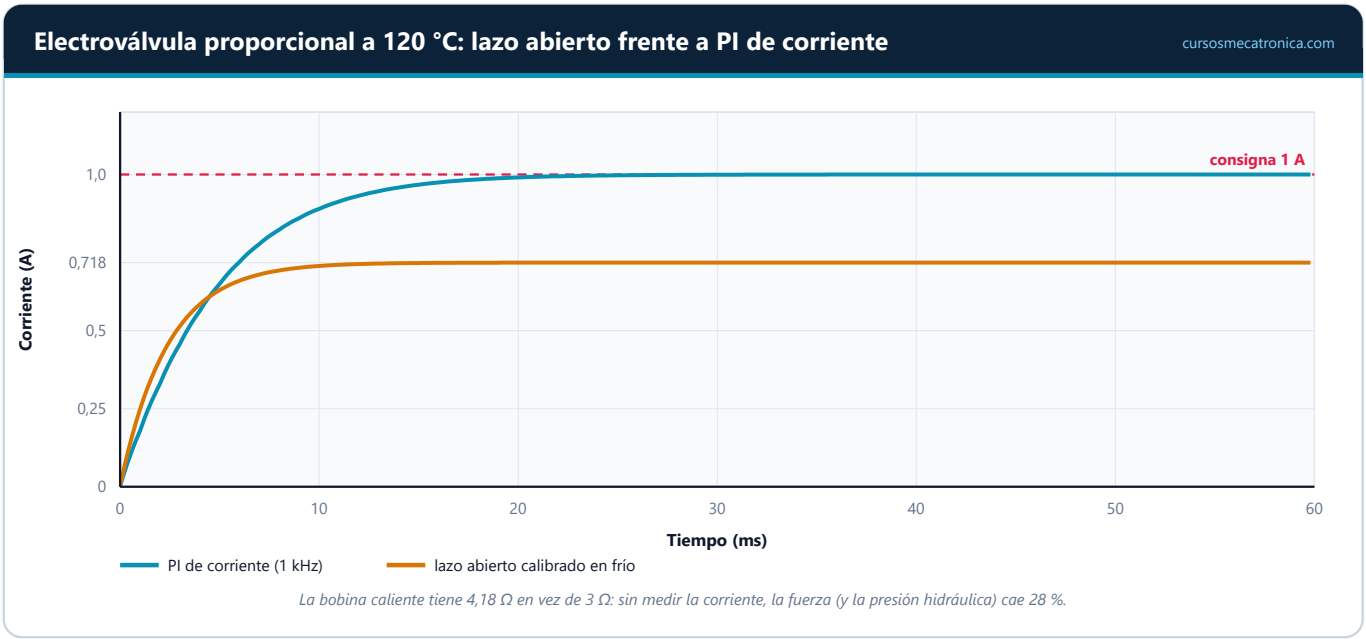
El DC con escobillas es barato (alzavidrios, limpiaparabrisas). El BLDC/PMSM conmutado electrónicamente dura más y es más eficiente (bombas, ventiladores, dirección). El paso a paso posiciona en lazo abierto (faros, mariposas antiguas).

Actuadores electrohidráulicos

En transmisiones automáticas y frenos se mueven válvulas con solenoides. La 3/2 de asiento es de todo o nada; las moduladas por PWM o los reguladores proporcionales de corredera fijan presión según la corriente.

Control de corriente y dither

La fuerza del solenoide depende de la corriente, no de la tensión. Como la resistencia de la bobina sube 0,39 % por °C, se mide la corriente y un PI ajusta el PWM. Un pequeño dither (oscilación de 100–300 Hz) evita que la corredera se pegue por fricción estática.



Salida de control_corriente_solenoide.py.

Diseño por simulación

Los modelos 1D multidominio (eléctrico, magnético, hidráulico) se combinan con dinámica de fluidos (CFD) y elementos finitos para la estructura y el circuito magnético.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Lorentz	$F = B \cdot I \cdot l$	Motor electrodinámico.
Tensión media	$V_{med} = d \cdot V_{bat}$	d: ciclo de trabajo.
Bobina	$L \cdot di/dt = d \cdot V - R(T) \cdot i$	$R(T) = R_{20}[1 + 0{,}00393(T - 20)]$.
Constante de tiempo	$\tau = L/R$	10 mH / 4,18 Ω = 2,4 ms.

Ejemplo resuelto: electroválvula caliente

1. Bobina de 3 Ω a 20 °C y 10 mH, batería 13,5 V; se pide 1 A.
2. A 120 °C, $R = 3 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot 100) = 4{,}18\ \Omega$ → hace falta 31,0 % de ciclo (22,2 % en frío).
3. Con el ciclo calibrado en frío la corriente queda en 0,718 A: 28 % menos fuerza.
4. El PI de corriente a 1 kHz llega a 1,000 A (95 % en 13,3 ms).

El lazo de corriente compensa la temperatura; con dither de ±0,1 A a 100 Hz la corriente oscila entre 0,969 y 1,031 A (control_corriente_solenoide.py).

Motores en el automóvil

Tipo	Ventaja	Uso
DC con escobillas	Barato y simple	Alzavidrios, asientos, limpiaparabrisas
BLDC / PMSM	Eficiente, sin desgaste	Bombas, ventiladores, EPS, tracción
Paso a paso	Posición en lazo abierto	Nivelación de faros, indicadores
Solenoide	Fuerza lineal rápida	Válvulas de transmisión, inyectores

Código del capítulo

Los archivos completos vienen en el paquete ZIP del capítulo (carpeta `codigo/`).

control_corriente_solenoide.py — modelo PWM de una bobina, lazo abierto frente a PI de corriente y dither.

```
"""
control_corriente_solenoide.py — Capítulo 07: control PI de la corriente de una
electroválvula proporcional con PWM, dither y compensación de temperatura.
"""
import math

V_BAT, L, R20, ALFA = 13.5, 0.010, 3.0, 0.00393


def r_bobina(temp_c):
    return R20 * (1 + ALFA * (temp_c - 20))


def simular(i_ref, temp_c, lazo_cerrado=True, t_fin=0.2, dt=1e-5, dither=0.0):
    """Modelo promedio del PWM: L·di/dt = d·V − R·i. Control a 1 kHz."""
    r = r_bobina(temp_c)
    i, integ, duty = 0.0, 0.0, 0.0
    kp, ki = 0.10, 60.0
    paso_control = int(1e-3 / dt)
    hist = []
    for k in range(int(t_fin / dt)):
        t = k * dt
        if k % paso_control == 0:
            ref = i_ref + dither * math.sin(2 * math.pi * 100 * t)
            if lazo_cerrado:
                e = ref - i
                integ += ki * e * 1e-3
                duty = min(1.0, max(0.0, kp * e + integ))
            else:
                duty = ref * r_bobina(20) / V_BAT      # calibrado en frío
        i += (duty * V_BAT - r * i) / L * dt
        hist.append((t, i))
    return i, duty, hist


if __name__ == '__main__':
    for t in (20, 120):
        print(f'Bobina a {t:3d} °C: R = {r_bobina(t):.2f} Ω,'
              f' ciclo de trabajo para 1 A = {100 * r_bobina(t) / V_BAT:.1f} %')
    i_abierto, _, _ = simular(1.0, 120, lazo_cerrado=False)
    print(f'\nLazo abierto calibrado a 20 °C, bobina a 120 °C: {i_abierto:.3f} A'
          f' ({100 * (i_abierto - 1):.0f} %)')
    i_pi, d, hist = simular(1.0, 120)
    t95 = next(t for t, i in hist if i >= 0.95)
    print(f'PI de corriente a 120 °C: {i_pi:.3f} A con {100 * d:.1f} % de ciclo; 95 % en {1000 * t95:.1f} ms')
    _, _, hd = simular(1.0, 120, dither=0.1)
```

```
    ult = [i for t, i in hd if t > 0.15]
    print(f'Con dither de ±0,1 A a 100 Hz: la corriente oscila entre {min(ult):.3f} y {max(ult):.3f} A')
```

Errores frecuentes

- Controlar una válvula proporcional por tensión: la fuerza deriva con la temperatura.
- Omitir el diodo de rueda libre y destruir el transistor al apagar.
- Dither demasiado grande: la presión oscila en vez de estabilizarse.

Autoevaluación

1. ¿Por qué se controla la corriente y no la tensión de un solenoide?
2. ¿Para qué sirve el dither?
3. ¿Qué permite el puente H?

Respuestas. 1. Porque la fuerza depende de la corriente y la resistencia cambia con la temperatura. **2.** Para vencer la fricción estática de la corredera. **3.** Invertir el sentido de giro y frenar.