

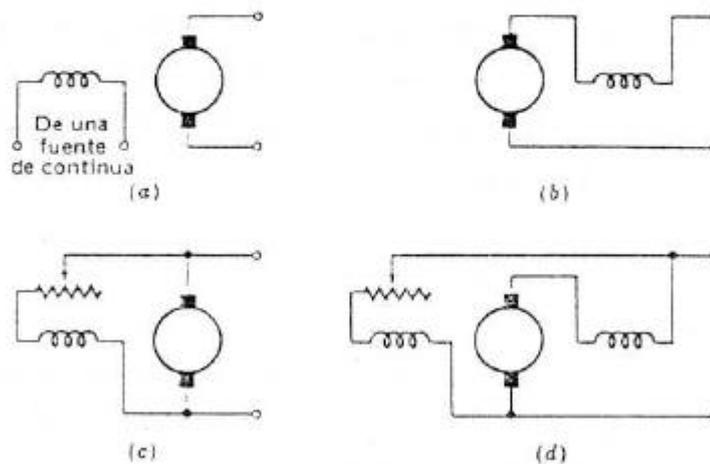
Modelado de Máquinas de Corriente Continua Código: P_ModMCC

A-702 Control I

E-504 Dinámica de los Sistemas Físicos

Las máquinas de corriente continua presentan varias formas de excitación, diferenciándose las mismas en el modo en que es conectado el arrollamiento de campo. El procedimiento que se adopte influye profundamente no solo en las características en régimen permanente (cupla-velocidad), sino también en el comportamiento dinámico de las máquinas en sistemas de control. La gran variedad de condiciones operativas que se pueden conseguir seleccionando adecuadamente la forma de excitar los devanados inductores constituyen, por lo tanto, la gran ventaja de las máquinas de corriente continua.

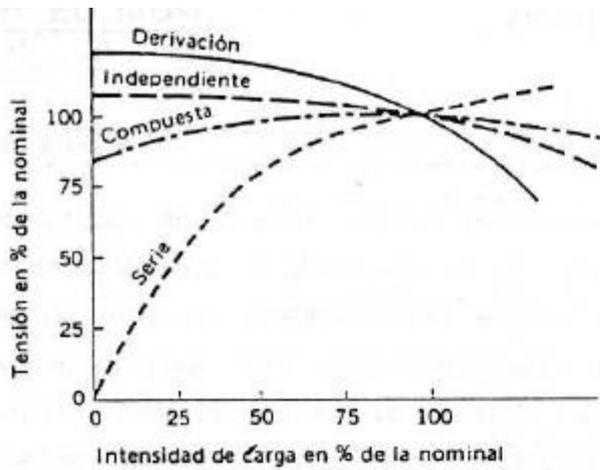
En la siguiente figura se representan cuatro formas diferentes de conectar el circuito inductor, siendo estas las más generales pero no las únicas:



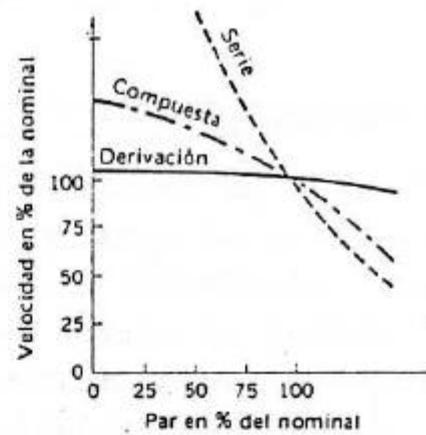
Conexiones del circuito de excitación en máquinas de corriente continua. (a) Excitación independiente; (b) en serie; (c) en derivación; (d) compuesta.

Cualquiera de los métodos de excitación mostrados en la figura pueden emplearse tanto para generadores como para motores.

Las curvas características de salida en régimen permanente para los distintos generadores y motores de corriente continua se detallan a continuación:



Características tensión-intensidad de generadores de continua.

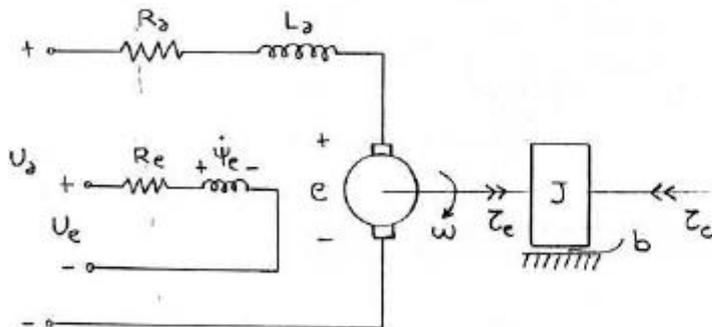


Características velocidad-par de motores de continua.

En el caso del generador las curvas volt-ampere se obtuvieron suponiendo a la máquina movida a velocidad uniforme por el motor primario. En el caso del motor las curvas par-velocidad se obtuvieron suponiendo al motor alimentado a tensión constante.

Problema 1: Motor de corriente continua (MCC) con excitación independiente

Cuando se desea controlar la velocidad del MCC en un ancho rango de variación y con un buen rendimiento de la máquina, se alimenta al circuito de campo en forma independiente del circuito de armadura. La siguiente figura corresponde al ΣΦI de un MCC con excitación independiente:

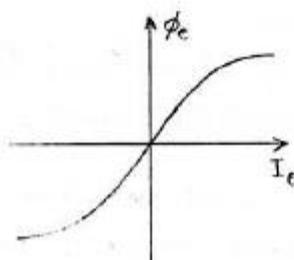


Ecuaciones generales del acople electromagnético-mecánico:

$$e = k \Psi_e \omega$$

$$\tau_e = k \Psi_e I_a$$

La característica magnética del arrollamiento de excitación es la siguiente:



donde ϕ_e es el flujo de excitación abrazado por espira. Por lo tanto el flujo total abrazado por el arrollamiento de excitación vale:

$$\Psi_e = N \phi_e$$

donde N es el número de espiras del arrollamiento de excitación.

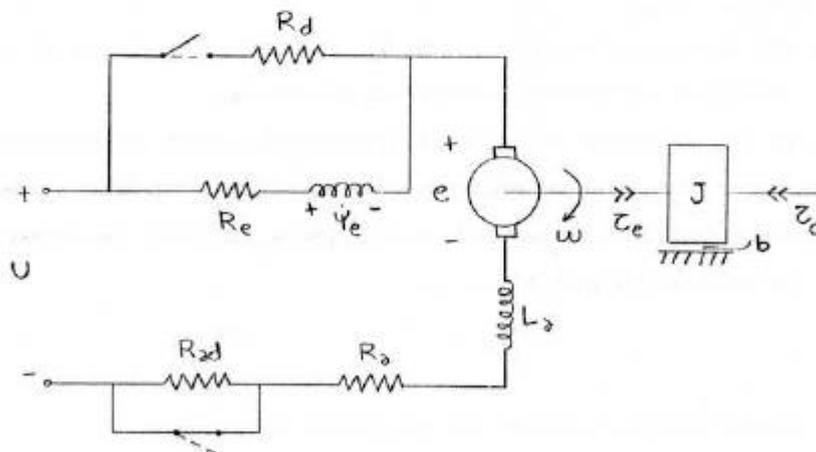
Suponiendo que se quiere realizar el modelo del MCC para estudiarlo como regulador de velocidad:

- Realice el DB correspondiente y escriba las EE.
- Realice un nuevo DB suponiendo excitación independiente constante y que se ha superado el transitorio de conexión del circuito de campo ($\Psi_e = \text{cte.}$). Halle las EE.
- En ambos casos indique el orden y la linealidad o alinealidad del modelo.

Problema 2: MCC con excitación serie

La aptitud de los motores serie de soportar fuertes pares de sobrecarga limitando, sin embargo, en virtud de la pérdida de velocidad, la sobrecarga de potencia, así como el hecho de ser capaces de resistir pares de arranque considerables, los hacen muy adecuados para el accionamiento de elevadores, grúas y para tracción.

La siguiente figura corresponde al $\Sigma\phi I$ de un MCC con excitación serie:



Realice el DB correspondiente y halle las EE. Indique el orden y la linealidad o la alinealidad del modelo.

Nota: Modélelo con las llaves en la posición dibujada y suponiendo L_s despreciable.

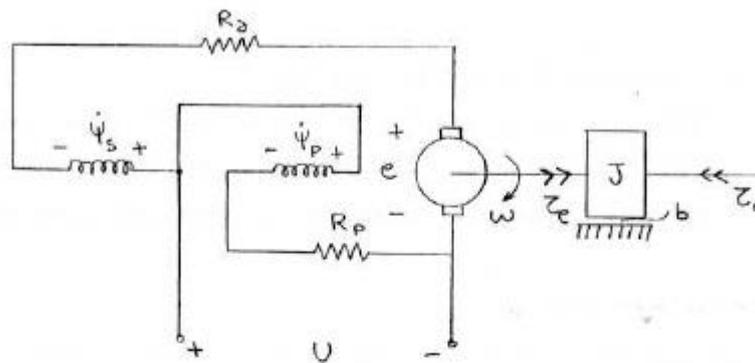
Problema 3: MCC con excitación compuesta

Los motores excitación compuesta con el campo del devanado serie muy dominante se comportan en todo aproximadamente igual que los motores serie, excepto en que

el campo del devanado derivación limita la velocidad en vacío a un valor de seguridad aceptable.

Los motores excitación compuesta con poco devanado serie compiten con los motores de inducción de jaula de ardilla de alta resistencia en el rotor (motores de alto deslizamiento). La característica velocidad-carga de estos motores resulta ideal cuando se utilizan volantes de inercia para absorber puntas de potencia intermitentes.

La siguiente figura corresponde al $\Sigma\Phi I$ de un MCC con excitación compuesta:



Realice el DB correspondiente y halle las EE. Indique el orden y la linealidad o la alinealidad del modelo.

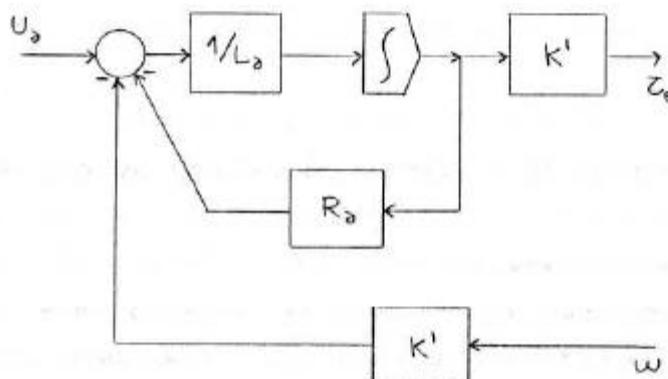
Problema 4: Generador

Los generadores de corriente continua son la solución inmediata al problema de convertir energía mecánica en energía eléctrica continua.

Realice los DBs de los motores anteriores trabajando como generadores. Suponga que se está alimentando una carga eléctrica (desconocida) modelada. Replantee las convenciones, compatibilizándolas con el funcionamiento como generador. Compare con los DBs para el modelo del motor.

Problema 5:

a) Verifique que la parte eléctrica del DB del punto 1-b) queda:



donde:

$$k' = k \Psi_e$$

b) Se simula el modelo anterior para distintas condiciones de funcionamiento, y al alcanzar el régimen permanente se obtienen los siguientes valores:

i) $i_a = -10 \text{ A}$
 $\omega = 150 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

ii) $U_a = -100 \text{ V}$
 $\omega = 300 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

donde:

$$R_a = 100 \ \Omega$$

$$k' = 0,330 \frac{\text{V}}{\text{G}}$$

En cada caso, determine si la máquina actúa como generador o como motor. Justifique.

Problema 6:

Deduzca las características estáticas de salida (τ vs ω) para los distintos MCCs detallados a continuación. En cada caso dibuje familias de curvas (τ , ω) para distintos valores de la tercer variable (U_a o Ψ_e , según corresponda) dentro de los rangos de acotación consignados:

a) MCC con excitación independiente. Analice el comportamiento de las curvas para:

a1) $0 < U_a < U_a \text{ nom}$, $\Psi_e = \Psi_e \text{ nom}$

a2) $U_a = U_a \text{ nom}$, $0 < \Psi_e < \Psi_e \text{ nom}$

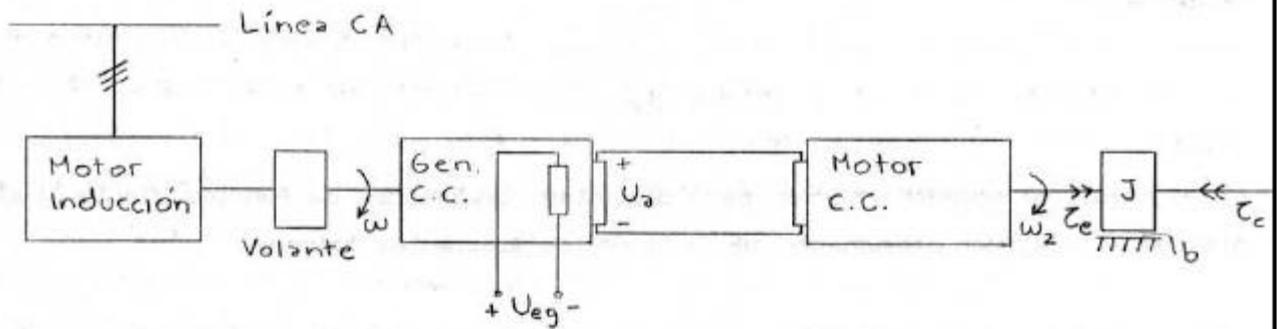
b) MCC con excitación serie, con $0 < U_a < U_a \text{ nom}$.

c) MCC con excitación compuesta, con $0 < U_a < U_a \text{ nom}$.

d) Vincule las curvas obtenidas con los comentarios realizados sobre cada una de las conexiones.

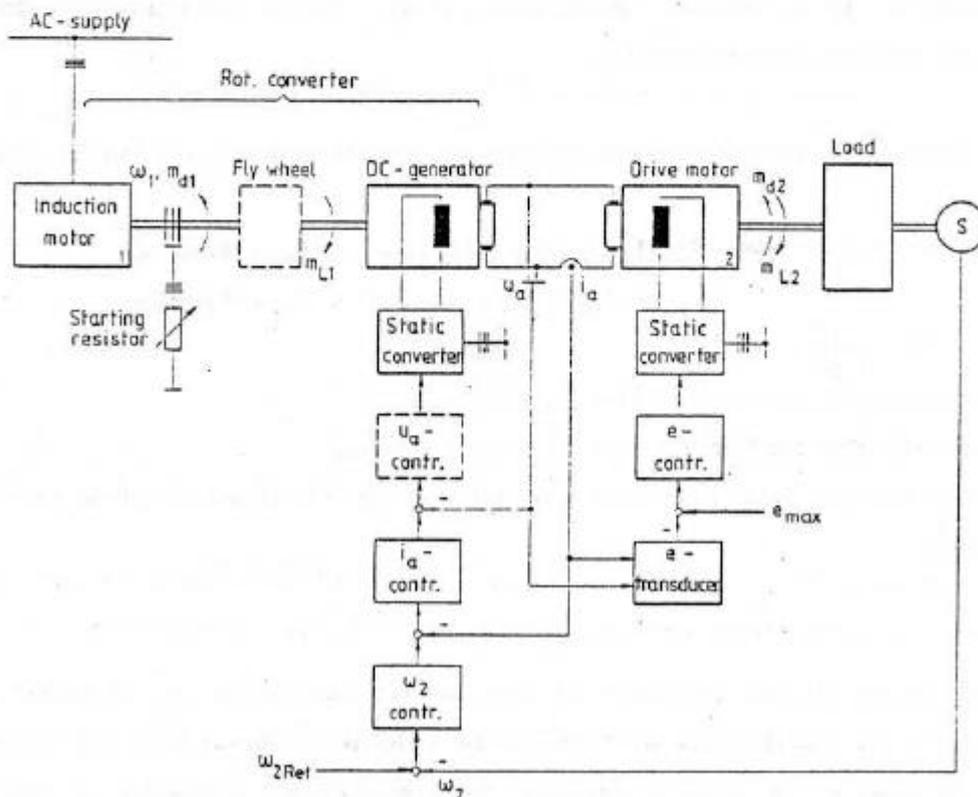
Problema 7:

Como puede deducirse del análisis de las curvas obtenidas en el punto a1) del problema 6, una de las formas de regular la velocidad de un MCC es variando su tensión de armadura. La manera clásica de lograrlo es mediante la disposición diseñada por Ward Leonard en 1891 (aún hoy vigente). Dicha disposición consta de un motor (generalmente de inducción) el cual está acoplado a un GCC al que se le controla su tensión de armadura mediante el campo, como se muestra en la figura:



- Realice el DB de la disposición GCC-MCC (alimentación campo generador → entrada, velocidad motor → salida). Suponga para el primero velocidad constante y para este último campo constante.
- Aplicando álgebra de bloques elimine los derivadores si existen y escriba las EE.
- Halle la FTN entre U_{eg} y ω_2 . Suponga que no hay saturación en el entrehierro del generador y que por consiguiente hay un único coeficiente de autoinducción en todo el rango de operación.

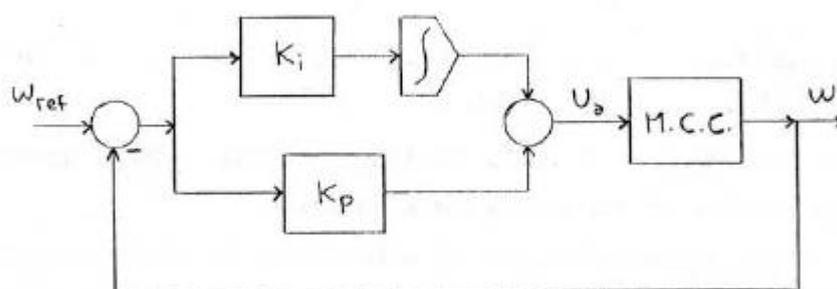
Nota: Un esquema funcional de la implementación tecnológica de un control automático Ward Leonard es la siguiente:



Problema 8

Una de las razones por las cuales se opta por máquinas de corriente continua en determinados procesos es la posibilidad que éstas ofrecen para trabajar en un amplio rango de velocidades con bajas pérdidas. Pero para alcanzar características de funcionamiento determinadas en presencia de variaciones de la alimentación o de la carga se hace necesario el uso de control de realimentación. Otra razón por la cual es común encontrar a una máquina de CC con un lazo de realimentación es la baja impedancia que presenta su circuito de armadura. Al ser excitada con su tensión nominal pueden circular por ella corrientes de hasta diez veces el valor nominal. Este efecto, en condiciones de régimen permanente, es cancelado por la fuerza contraelectromotriz inducida (e). En régimen transitorio (acelerándose o frenándose) son peligrosos los cambios bruscos en I_a debidos a cambios en ω . La mejor protección contra estos efectos bruscos es el uso de lazos de realimentación.

Utilizando el modelo obtenido en el punto 1-b), se desea implementar un control de velocidad. Para ello se propone un sistema como el siguiente:



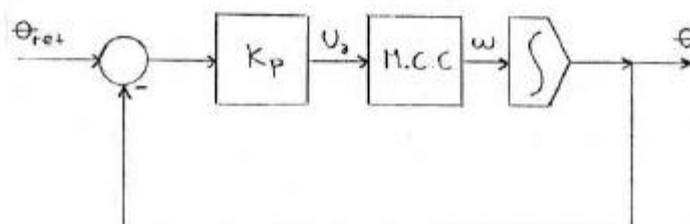
a) Realice el DB correspondiente.

b) Halle la FTN $\frac{\omega(s)}{\omega_{ref}(s)}$

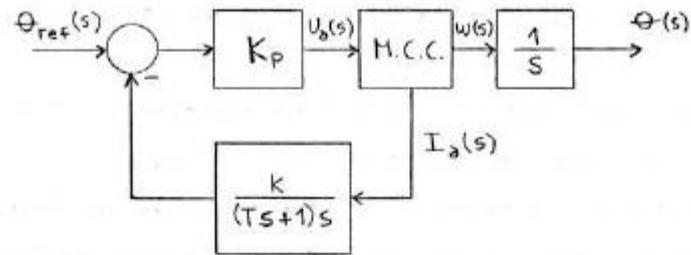
c) Particularice para $K_i = 0$.

Problema 9

Utilizando nuevamente el modelo del punto 1-b), se desea implementar ahora un control de posición. Para ello se propone un sistema como el siguiente:



Se asegura que se logra el mismo efecto si se sensa la corriente de armadura i_a y se utiliza un corrector como el que se ve:



a) Verifique que la aseveración es cierta y halle los valores de K y T para que se cumpla.

Sugerencia: Aplique álgebra de bloques.

Observación: Lo anterior funciona en condiciones ideales. En la práctica no anda. ¿Por qué?

b) Halle la FTN $\frac{\Theta(s)}{\Theta_{ref}(s)}$

c) Considerando que $\Theta_{ref} = 0$ halle la transferencia $\frac{\Theta(s)}{\tau_C(s)}$, donde $\tau_C(s)$ es la transformada de Laplace del torque de carga externo.

Compare el polinomio denominador con el obtenido en b). ¿Qué conclusiones puede extraer de la comparación? ¿Y de la comparación de los polinomios numeradores? (Al respecto calcule los regímenes permanentes debido a escalones en ambos casos).

Comentario Final

Los motores de corriente continua son aun hoy una elección común si se necesita controlar un dispositivo que opere en un amplio rango de velocidades. Esto, como ya fue dicho, es debido a sus excelentes propiedades operativas y características de control; la única desventaja de importancia técnica es el conmutador mecánico (colector) que restringe la potencia y velocidad del motor, incrementa la inercia y el largo axial y requiere mantenimiento periódico. Esto, además, implica un costo elevado en comparación con los motores de alterna, especialmente los de inducción (o asincrónicos) con rotor jaula de ardilla. En los motores de corriente alterna, el conmutador es eliminado, con lo que se logra gran robustez, compacidad y mucha menor relación peso-potencia. Se obtiene muy buena regulación de velocidad con convertidores estáticos (con semiconductores de potencia) a través del control de la frecuencia de alimentación. Debido a los recientes avances en la tecnología de los semiconductores y al consiguiente abaratamiento de los convertidores estáticos, los motores de corriente alterna están desplazando en gran medida a los motores de corriente continua en diversas aplicaciones de control.

Referencias

- * Leonhard, W., Control of Electrical Drives. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1985.
- * Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch., Kusko, A., Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas. Editorial Hispano Europea. Barcelona 1980.
- * Bose, Bimal K., Power Electronics and Motion Control. Technology Status and Recent Trends. Proceedings IEEE/PESC '92. Toledo (España).
- * Bose, Bimal K., Variable Frequency Drives - Technology and Applications. Proceedings IEEE. Int'l Symposium on Industrial Electronics. Budapest 1993.

Las referencias que se han dado aquí están disponibles en la cátedra Dinámica de los Sistemas Físicos. Todo aquel que esté interesado en ampliar sus conocimientos sobre el tema, puede consultarlas.