# Automática y Máquinas Eléctricas

# Proyecto Global Integrador (Año 2023)

## Control de Accionamiento de CA con

## Motor Sincrónico de Imanes Permanentes

**Alumnos: Legajos:**

Cazabán, Martín Gabriel xxxxxxx

Martín Duci, Ignacio 13560

**Profesor:**

Ing. Gabriel L. Julián

Junio – 2024

# Índice

## Resumen

## Introducción

## Desarrollo

* 1. **Modelado del sistema físico no lineal**

El problema que abordar incluye tres grandes elementos:

* Máquina eléctrica de corriente alterna trifásica sincrónica con excitación por imanes permanentes (*PMSM: Permanent Magnet Synchronous Machine*) con estator conectado en estrella simétrico y equilibrado, cada fase accesible por bornes y punto neutro flotante no accesible.

Imagen que contiene cámara

Descripción generada automáticamente

Ilustración 1 – PMSM

* Tren de transmisión de engranajes planetarios con caja reductora reversible, sin elasticidad torsional, deformaciones, holgura o juego. Asumimos un comportamiento completamente rígido y con pérdidas consideradas en el motor.

Imagen que contiene estructuras metálicas, equipo, foto, vídeo

Descripción generada automáticamente

Ilustración 2 - Tren de engranajes planetarios

* Brazo manipulador robótico de un grado de libertad rotacional de eje horizontal de carga variable en su extremo.

Diagrama, Dibujo de ingeniería

Descripción generada automáticamente

Ilustración 3 - Carga: brazo manipulador robótico de 1 g.d.l.

En primer lugar, se lleva a cabo el modelado del sistema físico el cual tiene las siguientes entradas y salidas:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Símbolo** | **Descripción** | **E/S** | **Observación** |
| T\_l [N.m] | Torque de carga | E |  |
| v\_as [V] | Tensión de fase “a” | E |  |
| v\_bs [V] | Tensión de fase “b” | E |  |
| v\_cs [V] | Tensión de fase “c” | E |  |
| theta\_r [rad] | Ángulo de referencia del rotor | E |  |
| theta\_m [rad] | Posición angular del rotor del motor | S |  |
| omega\_m [rad/s] | Velocidad angular del rotor del motor | S | Virtual, no medida. |
| i\_as [A] | Corriente de fase “a” | S |  |
| i\_bs [A] | Corriente de fase “b” | S |  |
| i\_cs [A] | Corriente de fase “c” | S |  |
| T\_s [º C] | Temperatura del estator | S |  |

Tabla 1 - Entradas y salidas del sistema físico

Se ha decidido segmentar dicho sistema en tres subsistemas: mecánico, electromagnético y térmico, permitiendo una mayor claridad y orden. Cada uno de estos subsistemas aborda los fenómenos específicos relacionados con su respectiva naturaleza, como sugiere su nombre, cabe destacar que estos no tienen un comportamiento independiente de los demás sino relacionado mediante las siguientes interfaces:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Subsistema de salida** | **Subsistema de llegada** | **Interfaz** | **Descripción** |
| Mecánico | Electromagnético | omega\_m [rad/s] |  |
| Electromagnético | Mecánico | T\_m [N.m] | Torque electromagnético |
| Mecánico | Térmico | - | - |
| Térmico | Mecánico | - | - |
| Electromagnético | Térmico | i\_qs [A], i\_ds [A], i\_0s [A] |  |
| Térmico | Electromagnético | R\_s [Ω] | Resistencia del devanado de cada fase |

Tabla 2 - Interfaces entre los diferentes subsistemas

Se presenta a continuación el diagrama de bloques correspondiente al subsistema físico realizado en Simulink.

Diagrama, Dibujo de ingeniería

Descripción generada automáticamente

Ilustración 4 - Diagrama de bloques del subsistema físico

Puede verse de forma ampliada en la siguiente imagen, notar la presencia de los tres subsistemas mencionados.

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

Ilustración 5 - Diagrama de bloques del subsistema físico expandido

Se ha implementado la Transformada de Park directa e inversa como un bloque de función de Matlab, se presenta a continuación el contenido de dichas funciones.

function [fqs, fds, f0s] = TD\_PARK(fas, fbs, fcs, theta\_r)

fabcs = [fas; fbs; fcs];

Ks = [cos(theta\_r) cos(theta\_r - 2\*pi/3) cos(theta\_r + 2\*pi/3)

sin(theta\_r) sin(theta\_r - 2\*pi/3) sin(theta\_r + 2\*pi/3)

1/2 1/2 1/2];

fqd0s = Ks \* fabcs;

fqs = fqd0s(1);

fds = fqd0s(2);

f0s = fqd0s(3);

end

function [fas, fbs, fcs] = TI\_PARK(fqs, fds, f0s , theta\_r)

fqd0s = [fqs; fds; f0s];

Ks = [cos(theta\_r) sin(theta\_r) 1

cos(theta\_r - 2\*pi/3) sin(theta\_r - 2\*pi/3) 1

cos(theta\_r + 2\*pi/3) sin(theta\_r + 2\*pi/3) 1];

fabcs = Ks \* fqd0s;

fas = fabcs(1);

fbs = fabcs(2);

fcs = fabcs(3);

end

En las siguientes secciones se profundizará en explicaciones referidas a cada subsistema.

* + 1. **Subsistema mecánico completo referido al eje del motor**

Partiendo de las ecuaciones correspondientes a los modelos matemáticos de cada elemento del sistema mecánico (motor, transmisión rígida y carga) obtendremos las ecuaciones correspondientes al modelo matemático del sistema mecánico completo referido al eje del motor. Teniendo en cuenta las siguientes **hipótesis:**

* Dientes de engranajes completamente rígidos en cualquier régimen de trabajo.
* Ausencia de holguras o juego.
* Ausencia de deformaciones.

Esto nos conduce a un sistema donde existe una **transferencia perfecta de potencia sin pérdidas.**

Modelo matemático de la carga:

|  |  |
| --- | --- |
|  | Ecuación 1 |
|  | Ecuación 2 |
|  | Ecuación 3 |
|  | Ecuación 4 |
|  | Ecuación 5 |

Modelo matemático del tren de transmisión.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Ecuación 6 |
|  | Ecuación 7 |
|  | Ecuación 8 |

Modelo matemático de la máquina eléctrica PMSM.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Ecuación 9 |
|  | Ecuación 10 |
|  | Ecuación 11 |

El siguiente paso será referenciar todos los sistemas mecánicos al rotor de la máquina eléctrica para esto se efectúan ciertas operaciones matemáticas.

En la **ecuación 9** se busca reemplazar para esto se hace uso de la **ecuación 8**, efectuando el despeje de la anterior variable mencionada obtenemos . Podemos conocer el valor de al despejarlo de la **ecuación 1**, se obtiene y dividiendo por obtenemos , queda entonces aplicar la **ecuación 6** y su derivada respecto al tiempo para obtener es importante destacar que el término ha sufrido también un cambio por la aplicación de la **ecuación 6**, este puede verse en la **ecuación 4** que ahora resulta ser . Por último aplicamos lo obtenido a la **ecuación 9** agrupando

A fines de sintetizar se declaran las ecuaciones obtenidas:

|  |  |
| --- | --- |
|  | Ecuación 12 |
|  | Ecuación 13 |
|  | Ecuación 14 |

En la **ecuación 14** hemos obtenido el modelo mecánico completo referido al eje de rotor, siempre recordando la modificación de presente en la **ecuación 13.**

El diagrama de bloques correspondiente al subsistema (en Simulink) es el siguiente:

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Ilustración 6 - Subsistema mecánico completo

* + 1. **Subsistema electromagnético**
    2. **Subsistema térmico**
    3. **Conclusiones del modelo**

## Conclusiones

## Referencias