

ELECTRIC MOTORS TRANSIENT PROCESSES
PROCESOS TRANSITORIOS EN MOTORES ELÉCTRICOS

MSc. Jorge Luis Díaz R, PhD. Aldo Pardo García, PhD. Antonio F. Muñoz Moner

Universidad de Pamplona

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia
Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 156
{jdiazcu, apardo13, amunozm}@unipamplona.edu.co

Abstract: This paper deals with the modeling and simulation the most common transient processes that happen in the electric motors. The mathematical models of the motors used in the simulation are shown. The develop programs serve as complement for the teaching of the topic transient processes of electric motors. Several transitory processes were simulated as the starting process, according to the motor type, dynamic and electric braking, different kind of short circuit, abrupt changes of load, etc. The results of this work can also be used for the design and analysis of the operation of different electric drives and the electric machines.

Resumen: En este trabajo se modelan y simulan los procesos transitorios más frecuentes que ocurren en los motores eléctricos. Se muestran los modelos matemáticos de los motores utilizados en la simulación. Los programas sirven de complemento para la enseñanza del tema procesos transitorios de motores eléctricos. Se simularon varios procesos transitorios como el de arranque según el tipo de motor, de frenado dinámico y contracorriente, el de cortocircuito, el de cambio brusco de carga, etc. Los resultados de este trabajo pueden emplearse además para el diseño y análisis de la operación de los sistemas de accionamientos eléctricos y las máquinas eléctricas.

Keywords: Induction motor, Transient process, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos transitorios tienen lugar cuando se pasa de un régimen establecido a otro. Ellos surgen a raíz del cambio de tensiones de las redes eléctricas, de las resistencias de los devanados, de la carga o del par exterior de rotación aplicado al eje del motor. Durante los procesos transitorios en los devanados de las máquinas pueden aparecer corrientes varias veces superiores a las nominales.

El par y las fuerzas electromagnéticas también pueden resultar mucho mayores que los de régimen nominal. En algunos casos pueden manifestarse elevadas tensiones eléctricas inadmisibles en algunos elementos de las máquinas eléctricas. La máquina eléctrica debe soportar sin deterioros los procesos transitorios esperados. La teoría debe garantizar la posibilidad de prever el transcurso de los procesos transitorios de explotación.

El cálculo previo de un proceso transitorio de emergencia (por ejemplo, de un cortocircuito inesperado), es necesario para el ajuste de las protecciones de las máquinas eléctricas que las desconecta de la red. El análisis de los procesos transitorios en motores eléctricos es un problema actual, pues a partir del análisis dinámico se obtienen criterios de diseño para la selección del tipo de motor y convertidor que accionarán la carga industrial.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE CD

Para poder simular los sistemas de accionamiento eléctrico es necesario tener el modelo de la máquina a utilizar, ya que este es el eslabón fundamental y objeto de análisis a las más variadas condiciones en régimen dinámico. A continuación se desarrollan los modelos matemáticos de los dos motores utilizados.

2.1 Modelo Matemático del Motor de CD

Los motores de corriente directa, todavía hoy en día son la opción común si se necesita de accionamientos eléctricos que operen en un rango amplio de velocidad. Esto es debido a sus propiedades operacionales y sus características de control, siendo la única desventaja esencial el conmutador mecánico, el cual restringe la potencia y velocidad del motor, aumenta la inercia, la longitud axial y necesita mantenimiento periódico. Con los motores de alterna, alimentados con convertidores estáticos de frecuencia, el conmutador es eliminado, sin embargo a un considerable costo y complejidad.

2.2 Modelo físico del motor de corriente directa

El modelo matemático del motor de corriente directa de excitación independiente se realizó según el circuito equivalente de dicho motor, junto con los parámetros mecánicos y el mecanismo de carga acoplado. Para el análisis del sistema se utilizó un modelo linealizado, aunque en el modelo de la máquina de directa existe una relación no lineal que afecta los valores de inductancias del modelo. Esta es la relación entre la corriente de excitación i_f y el flujo por polo ϕ , es conveniente expresarla por la ecuación:

$$e_a = k\phi w = f(i_f)_{w=\Omega_{sc}} \quad (1)$$

Donde:

- k Constante constructiva de la máquina.
- ϕ Flujo electromagnético del campo.
- e_a Fem inducida en los devanados de la armadura.

Esta ecuación es usualmente dada por el fabricante en forma de curva de saturación en la cual se gráfica e_a contra i_f para una velocidad dada. En nuestro caso como el control es en el circuito de la armadura, no es de nuestro interés el devanado de excitación ya que el valor del flujo (ϕ) va a ser siempre un valor constante y pertenece a la parte lineal de la curva de saturación por lo que no debemos tomar en cuenta la saturación. De esta forma las expresiones matemáticas que describen el comportamiento del motor de CD se pueden obtener de aplicar las leyes de Ohm y Kirchhoff. Obteniendo las siguientes ecuaciones eléctricas:

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2)$$

$$V_t = k\phi w + L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (3)$$

Donde:

- i_w, i_f Corrientes de armadura y excitación.
- R_w, R_f Resistencias de armadura y excitación.
- L_w, L_f Inductancias de armadura y excitación.
- V_w, V_f Voltajes de los terminales y de la excitación

2.3 Ecuación mecánica

La ecuación mecánica relaciona las variables eléctricas del motor con la carga, según la segunda Ley de Newton para el movimiento rotatorio. Ella describe el comportamiento de la velocidad mecánica, o también la posición del rotor, en función del par electromagnético y los parámetros de la carga. En términos de la velocidad mecánica se puede escribir:

$$J p w_m + B w_m + T_c = T_e \quad (4)$$

Donde:

- w Velocidad del motor.
- T_e, T_c Par electromagnético motor y carga.
- J Momento de inercia motor y carga.
- B Constante viscosa del motor y carga.
- p Operador de Laplace ($p = d/dt$)

2.4 Parámetros

Datos nominales del motor de CD de excitación independiente utilizado en la simulación:

V (v)	N (rpm)	HP (hp)	P (kw)	I _n (A)
230	1150	3	2.24	11
R _a (Ω)	L _a (mH)	J _m (kg.m ²)	B (Nms)	
1.43	10.4	0.068	0.002	

3 MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción debido a sus características constructivas y su naturaleza de funcionamiento, es un sistema de significativa complejidad en términos de análisis y modelación. Siendo así, su modelaje es afectado por varias idealizaciones con el objetivo de hacer más simple, tanto el propio proceso de modelación, como el modelo resultante. Con este mismo objetivo, son también utilizados cambios de variables que permiten obtener modelos más simples para el motor de inducción, sin implicar idealizaciones.

En la literatura donde se estudia problemas del control de motor de inducción, el modelo es presentado de diversas formas distintas. Estas diferentes formas de presentación del modelo del motor de inducción se relacionan entre sí por cambios de variables y pueden ser obtenidos fácilmente una de otras.

3.1 Modelo físico del motor de inducción

Para fines de modelación, será considerado un motor de inducción trifásico, de P polos, conectado en estrella, constituido de un enrollado simétrico en el estator, o sea compuesto de tres enrollados idénticos desfasados geométricamente a 120 grados, y de un enrollado semejante en el rotor.

La teoría generalizada de las máquinas eléctricas introduce una serie de consideraciones con el objetivo de simplificar el proceso de modelación y también el modelo resultante. Equivale a decir que las máquinas son consideradas ideales. Las hipótesis generalmente consideradas son:

1. La saturación magnética es despreciada. Se considera válida la superposición de los flujos y todas las inductancias son consideradas independientes de la magnitud de las corrientes.
2. La distribución espacial de fuerzas magnetomotrices y del flujo en el entrehierro son consideradas sinusoidales y simétricas en relación con el eje magnético de los enrollados.

3. La distorsión en el flujo introducida por el efecto de las ranuras es ignorada. Los enrollados son considerados que están constituidos de una distribución sinusoidal de conductores de diámetros despreciable.

Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el material magnético son despreciadas. Todas estas hipótesis introducen simplificaciones en la modelación, a través de desconsideración de algún fenómeno que ocurre en la realidad. Introduciendo, por tanto, imperfección en la modelación. La hipótesis más restrictiva es, ciertamente, la desconsideración de saturación magnética. En muchos casos su efecto no puede ser despreciado. Para estos casos, algunas técnicas pueden ser utilizadas para introducir en el modelo final el efecto de saturación magnética.

3.2 Ecuación mecánica

Como en el mismo caso del motor de corriente directa, la ecuación mecánica relaciona las variables eléctricas del motor con la carga, según la segunda ley de Newton para el movimiento rotatorio. En términos de la velocidad mecánica se puede escribir:

$$J p w_m + B w_m + T_c = T_e \quad (5)$$

Expresando en términos de la velocidad angular eléctrica del rotor w_r , según $w_r = P/2 w_m$, obtenemos:

$$J p w_r + B w_r = \frac{P}{2} (T_e - T_c) \quad (6)$$

Donde P representa el número de polos del motor.

3.4 Modelo del motor de inducción en varios sistemas de coordenadas

Escogiendo adecuadamente la velocidad del sistema de coordenadas arbitrario w , se puede obtener características particulares en el modelo del motor de inducción. Tres casos particulares son de gran interés:

- $w = 0$ sistema de coordenadas fijo en el estator. Coincide con sistema de coordenadas estacionario o también como sistema de coordenadas $\alpha\beta$.
- $w = w_r$ sistema de coordenadas fijo en el rotor. Es poco utilizado en la literatura para motor de inducción. Sin embargo, es de mucha importancia para el motor sincrónico.

- $w = w^e$ es conocido como sistema de coordenadas sincrónico, por girar con la frecuencia sincrónica de las tensiones de alimentación.

A continuación se muestra el modelo del motor de inducción en el sistema de coordenadas arbitrario:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + w \lambda_{ds} \quad (7)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - w \lambda_{qs} \quad (8)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} + (w - w_r) \lambda_{dr} \quad (9)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - (w - w_r) \lambda_{qr} \quad (10)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}, \quad \lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (11)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}, \quad \lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (12)$$

$$J p w_r = -B w_r + \frac{P}{2} (T_e - T_c) \quad (13)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (14)$$

$$w_m = \frac{2}{P} w_r \quad (15)$$

Donde λ representa las concatenaciones de flujo.

El sistema de coordenadas sincrónica es el más utilizado en estudio del motor de inducción por presentar la importante propiedad de representar las variables sinusoidales del sistema de coordenadas trifásico por valores constantes.

3.5 Parámetros

Datos nominales del motor de CA jaula de ardilla son:

V (v)	F _n (Hz)	HP (hp)	P (kw)
208	60	3	2.24
I _n (A)	T _n (Nm)	P	
10	1.43	4	
R _s (Ω)	R _r (Ω)	L _s (mH)	L _r (mH)
0.6	0.4	61.1	61.1
L _m (mH)	J _m (kg.m ²)	B (Nm s)	
59	0.05	0.002	

4.0 SIMULACIONES

Para el análisis de este proceso transitorio se supone que la máquina de CA está alimentada por un sistema balanceado de voltaje.

Se obtienen los resultados de la simulación del proceso de arranque con ayuda del Simulink[®], en forma de gráficos en función del tiempo de variables como el par electromagnético, la velocidad del motor y la corriente consumida por el mismo así como la velocidad en función del par.

4.1 Proceso de arranque del motor

Del proceso de arranque se pueden obtener criterios sobre el tiempo de duración del proceso transitorio de arranque, se puede apreciar la diferencia entre la característica mecánica dinámica desarrollada por el motor con respecto a la característica mecánica estática idealizada en el arranque. Se observa la variación transitoria brusca de la corriente consumida por el motor, la cual debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el accionamiento, así como las protecciones del mismo. En la enseñanza y en el proceso de diseño de un accionamiento eléctrico es interesante el análisis del proceso de arranque, variando la magnitud de la carga conectada y la magnitud del momento de inercia del motor y la carga, así como los valores de la resistencia a poner en serie en el circuito de la armadura en el caso del motor de CD, de forma que el arranque se ajuste a los requerimientos del proceso productivo en cuestión.

A continuación se muestran las gráficas de la velocidad y par en la simulación del proceso de arranque con, la primera gráfica corresponde al motor de CD y la segunda al motor de CA.

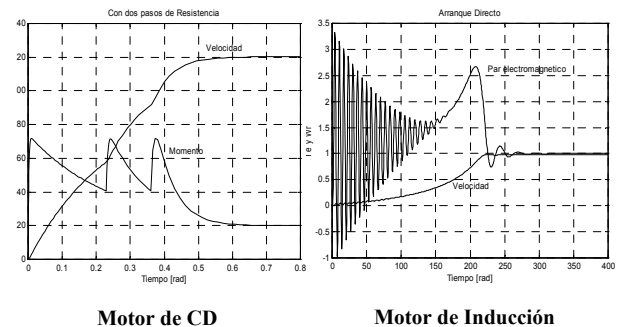


Fig. 1: Simulación del proceso de arranque

4.2 Proceso de frenado por contracorriente

Para la simulación de este proceso en el motor de CD se invierte el voltaje en los terminales del circuito de armadura del motor, lo cual es equivalente a intercambiar el signo del voltaje aplicado a dichos terminales del voltaje de alimentación.

En el caso del motor de CA se invierte el voltaje en dos de las fases del motor, lo cual es equivalente a intercambiar dos de las tres ecuaciones del voltaje de alimentación del motor. En ambos casos son necesarias las condiciones iniciales del proceso, las cuales pueden obtenerse a partir de las condiciones de estado estable del proceso de arranque.

El modelo matemático que se emplea es el mismo que el utilizado para el proceso de arranque. En él se determinan las dependencias del par, velocidad y corriente en función del tiempo, además de las características mecánicas para el caso de arranque seguido de un proceso de frenado por contracorriente.

Analizando estas características se pueden obtener criterios para el diseño y análisis de accionamientos eléctricos, en el caso de estar sometido a un frenado de este tipo. Al igual que en el caso del arranque, es interesante hacer un análisis de este proceso, realizando variaciones del par de la carga, el momento de inercia y las resistencias del rotor, lo cual enriquece los criterios de diseño.

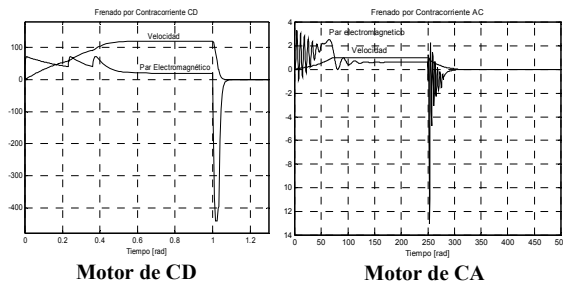


Fig. 2: Simulación del frenado por contracorriente.

4.3 Proceso de frenado dinámico

Durante el frenado dinámico, el motor de corriente directa de excitación independiente se desconecta de la red de corriente directa que lo alimenta y se conecta, en serie con los terminales de la armadura, una resistencia conocida como resistencia de frenado dinámico, mientras que el motor de inducción se desconecta de la red trifásica y se conectan las fases del estator a una fuente de corriente directa. Esta conexión se hace en dependencia al par de frenado deseado. Para una buena simulación de este proceso es necesario partir de las condiciones iniciales, las cuales pueden obtenerse a partir del estado estable del proceso de arranque. A partir de esta simulación se obtienen las dependencias del par, corriente y velocidad en función del tiempo, así como del par

en función de la velocidad, durante un proceso de arranque, seguido de un frenado dinámico.

Como en el caso anterior, analizando estas características se pueden obtener criterios para la selección del motor, el convertidor y las protecciones del accionamiento eléctrico. Es interesante realizar el análisis del comportamiento dinámico del accionamiento durante este proceso variando la corriente directa de frenado, en el caso del motor de CA y la resistencia de frenado en el motor de CD, así como la carga y su inercia.

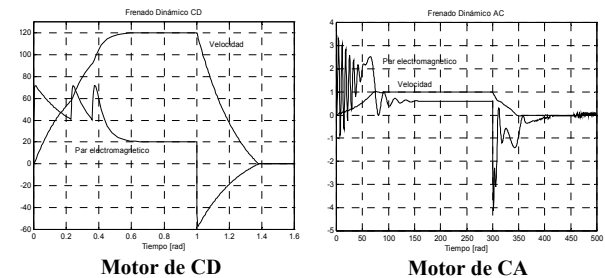


Fig. 3: Simulación del frenado dinámico.

4.4 Procesos de cortocircuito de estator

Se simulan todos los cortocircuitos que pueden ocurrir tanto en la máquina de CD como en la máquina de inducción. Se debe tener en cuenta que el voltaje de alimentación se anula instantáneamente en dependencia del tipo de cortocircuito ocurrido (CA). Las condiciones iniciales se toman a partir del estado estable, obtenido del proceso de arranque.

Como resultado de la simulación se obtienen las características del par, corriente y velocidad en función del tiempo, así como la característica mecánica para el caso de un arranque directo seguido de un proceso de cortocircuito. Es interesante, al igual que en los casos anteriores, para la máquina de CA, realizar la simulación de estos procesos teniendo en cuenta las variaciones del par de carga, el momento de inercia equivalente en el eje del motor y las resistencias del rotor de la máquina para cada tipo de cortocircuito.

Analizando las diferentes características de cada tipo de cortocircuito se pueden obtener criterios para la selección, coordinación y cálculo de las protecciones del motor. En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en el caso de un cortocircuito trifásico en el motor de CA.

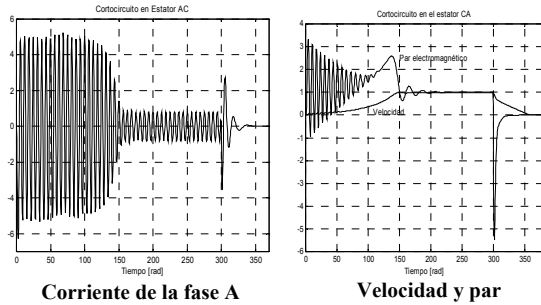


Fig. 4: Simulación del cortocircuito trifásico.

4.5 Proceso de cambio brusco de la carga

Cuando se analiza este proceso se emplea el mismo modelo matemático que en el arranque, solamente se realiza un cambio del par de la carga en forma de paso escalón o de rampa y se obtienen los resultados de la simulación.

Simulando se obtiene la dependencia existente entre el par, corriente y velocidad en el tiempo de duración del proceso transitorio de arranque, seguido del cambio brusco de la carga, también se muestra la característica mecánica. Estas dependencias funcionales son muy importantes a la hora de diseñar un accionamiento eléctrico que trabajará constantemente en régimen dinámico, como es el caso, por ejemplo, de un elevador de pasajeros. Es interesante el análisis del accionamiento eléctrico sometido a este régimen, cuando el momento de inercia equivalente en el eje del motor es variable, así como el valor de las resistencias.

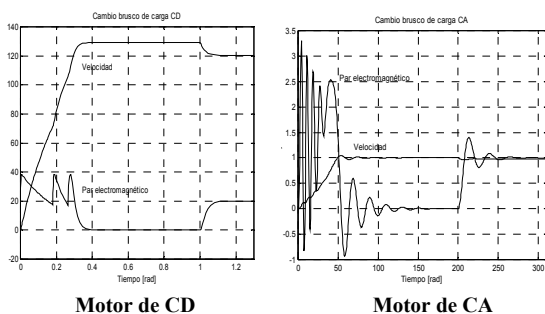


Fig. 5: Simulación de cambio brusco de carga.

5. CONCLUSIONES

1. Empleando el modelo matemático del accionamiento para el proceso de arranque se pueden obtener criterios para la selección del motor, el convertidor y las protecciones.

2. Simulando los procesos de frenado por contracorriente, frenado dinámico y cambio brusco de la carga empleando los modelos matemáticos desarrollados, se obtienen criterios para el diseño del accionamiento que estará sometido a tales regímenes de operación.
3. Analizando el proceso transitorio de cortocircuito mediante simulación por computadora se pueden obtener criterios para la selección y coordinación de las protecciones del sistema de accionamiento.
4. Las condiciones iniciales necesarias para la simulación de los diferentes procesos dinámicos se obtienen a partir de la operación en estado estable, posterior al proceso de arranque del accionamiento.
5. Los modelos matemáticos obtenidos y la metodología de simulación anteriormente expuesta puede emplearse en la enseñanza de las asignaturas Máquinas Eléctricas y Accionamiento Eléctrico.

REFERENCIAS

- Barbi, I., *Introdução ao Estudo do Motor de Indução*, Universidade Federal de Santa Catarina, 1988.
- Díaz R., J.L. Simulación de Sistemas de Accionamiento Eléctrico. Trabajo de Diploma, Universidad de Camagüey, 1996.
- Fitzgerald, A.E., Kingsley y Umans. *Electric Machinery*. 5th Edition. New York: McGraw Hill, 1990.
- Kovacs, K. P., *Transient Phenomena in Electrical Machines*, Akademi Kradó, Budabest, 1986.
- Krause, P. C., *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, Series in Electrical Engineering, USA, 1986.
- Pardo, A; Díaz, J. L. *Fundamentos en Sistemas de Control Automático*. Universidad de Pamplona. 2004.
- Reginatto, R.; Rico, J. E., *Modelagem do motor de Indução*, Nota Técnica de Laboratório – LCMI, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.