

APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE PARK PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

Pablo A. Massa, María de las Mercedes Sampere, Juan M. Trepát

Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 48 y 116 - La Plata - Bs. As. Argentina.
juanmtrepat@gmail.com

Palabras claves:

Transformación de Park / Régimen transitorio / Motor asincrónico trifásico (MAT).

Resumen

En los procesos industriales la máquina eléctrica desempeña un papel significativo. En la evolución del proceso es sometida a solicitaciones de régimen permanente y transitorio o dinámico. Arranques frecuentes, ciclos variables de carga mecánica, desequilibrios y fluctuaciones de tensiones conviven con periodos de funcionamiento en régimen permanente.

Lo anterior revela sucintamente la importancia de los estudios en el denominado régimen transitorio, resolubles mediante programas de cálculo especialmente dedicados.

No obstante mediante utilitarios dedicados al estudio de transitorios de circuitos eléctricos y la aplicación de la transformación de Park es posible desarrollar significativos y sencillos métodos de análisis para estudiar el comportamiento dinámico de las máquinas eléctricas de "flujo radial".

Este documento desarrolla una experiencia combinada de simulación, empleando el concepto anterior, y de experimentación para analizar el comportamiento de un motor asincrónico trifásico (MAT) en régimen dinámico.

Se comprueban coincidencias aceptables entre los resultados de la modelación y aquellos que se obtienen de la práctica experimental.

A partir de esta comprobación se valida el procedimiento desarrollado y se estudian diferentes modos de comportamiento dinámico de un MAT.

La metodología desarrollada es apropiada para la solución de problemas concretos en motores trifásicos y resulta un instrumento de aplicación docente de relativa sencillez.

Introducción

En la práctica de la ingeniería electrotécnica es muy frecuente elaborar modelos de diversos dispositivos para analizar y predecir estados de funcionamiento. Para ello en base a consideraciones fenomenológicas y estructurales del dispositivo en cuestión y de una serie de hipótesis simplificadoras se llegan a los conocidos "circuitos equivalentes". Estos aportan soluciones aproximadas tanto más apropiadas en cuanto aun con las simplificaciones efectuadas se obtengan resultados técnicamente aceptables que no vayan en detrimento sustancial del comportamiento real del dispositivo.

En síntesis como en todo emprendimiento ingenieril el "grado de aproximación se encuentra en relación inversa al grado de simplificación de análisis".

En el caso de los dispositivos empleados en la conversión electromecánica por acoplamiento de campo magnético radial, como es el caso de los motores eléctricos de inducción trifásicos

también, denominados motores asincrónicos trifásicos (MAT), el estudio en régimen permanente se obtiene del conocido circuito equivalente [1] indicado en la figura 1.

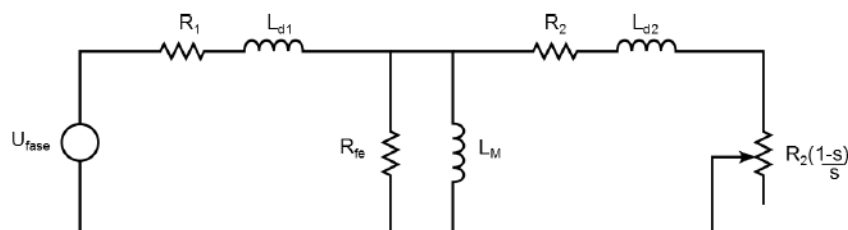


Fig. 1 - Circuito equivalente por fase del motor asincrónico trifásico

Donde:

U_{fase} : Tensión eficaz del estator por fase.

R_1 : Resistor equivalente del bobinado del estator.

R_2 : Resistor equivalente del bobinado del rotor referido al estator.

L_{d1} : Inductor equivalente de dispersión del estator.

L_{d2} : Inductor equivalente de dispersión del rotor referido al estator.

R_{fe} : Resistor equivalente de pérdidas en el núcleo ferromagnético.

L_M : Inductor de magnetización.

s : Resbalamiento en por unidad.

En él se asumen parámetros constantes y se obtienen con suficiente aproximación importantes características de funcionamiento, como por ejemplo, la característica "cupla - resbalamiento", en régimen permanente, y la corriente y el tiempo de arranque. Para ciertas aplicaciones esto puede ser suficiente.

Sin embargo, en los procesos industriales son frecuentes los arranques, las paradas y los frenados, que hacen necesario formular otros modelos. Estos modelos tienen que servir para estudiar el régimen transitorio y permitir analizar el comportamiento dinámico del sistema "accionamiento-carga", en consecuencia, el modelo empleado para el MAT tiene que permitir obtener esta respuesta instantánea.

Este documento desarrolla un método basado en la transformación de Park para analizar el comportamiento de un motor asincrónico trifásico en régimen dinámico, a partir del cual se obtienen resultados analíticos que luego son razonablemente validados mediante resultados experimentales.

Consideraciones para el modelado de régimen transitorio

Para el estudiar el funcionamiento del MAT en régimen transitorio se representa la máquina mediante circuitos eléctricos con los parámetros concentrados de resistores e inductores, y se formulan las ecuaciones diferenciales pertinentes donde las tensiones, corrientes y flujos magnéticos se expresan en valores instantáneos y los coeficientes de los inductores variables con la posición relativa de los bobinados.

Estas ecuaciones resultan bastante trabajosas de resolver aun aplicando hipótesis de linealidad de los parámetros circuitales y métodos numéricos computacionales.

Por ello se aplican transformaciones que simplifican la cuestión, en principio reduciendo el número de ecuaciones al considerar la máquina trifásica como una bifásica equivalente, con lo cual aún subsiste un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales y coeficientes variables.

Para solucionar esto se aplica una nueva transformación para evitar que los coeficientes de los inductores varíen en el tiempo como consecuencia de la rotación de una de las partes de la máquina y por ende de la posición relativa de los devanados como es habitual expresarse en estos casos.

Resueltas la ecuaciones en términos de las variables transformadas se antitransforman y se obtiene así la respuesta en valor instantáneo de las variables originales.

Simulación del MAT

En la actualidad existen muchos programas para simular circuitos eléctricos/electrónicos, de libre licencia, los cuales sirven para analizar, entre otras funciones, la evolución de las variables de interés (corrientes, tensiones, etc.) en el tiempo. Estos programas son de gran utilidad a los estudiantes de ingeniería que cursen materias relacionadas con el estudio de circuitos eléctricos/electrónicos, la desventaja de estos programas es que en su mayoría no poseen modelos de máquinas eléctricas en general, y MATs en particular, para su estudio y simulación.

Para simular el comportamiento dinámico de un MAT se plantean las ecuaciones que definen el comportamiento transitorio y utilizando la transformación de Park, en el modelado del motor se resuelven mediante programas de simulación de circuitos eléctricos/electrónicos básicos. Se utilizan inductores, resistores, fuentes independientes y dependientes y bloques de control, todos ellos de uso común en la mayoría de los programas de simulación antes mencionados. Para ello previamente es necesario determinar los parámetros que componen al motor mediante los ensayos clásicos. Estos parámetros serán los coeficientes de las ecuaciones dinámicas del MAT.

Al aplicar la transformación de Park a las ecuaciones diferenciales que determinan el comportamiento dinámico de un MAT [6] [7], se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} v_{qs} = R_1 i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} & (1) \\ v_{ds} = R_1 i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{qr}' = R_2' i_{qr}' + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}' + \frac{d\lambda_{qr}'}{dt} & (3) \\ v_{dr}' = R_2' i_{dr}' - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}' + \frac{d\lambda_{dr}'}{dt} & (4) \end{cases}$$

Los flujos λ_{qs} , λ_{qr} , λ_{ds} , λ_{dr} quedan expresados de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \lambda_{qs} = L_{d1} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i_{qr}') & (5) \\ \lambda_{ds} = L_{d1} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i_{dr}') & (6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \lambda_{qr}' = L_{d2}' i_{qr}' + L_M (i_{qs} + i_{qr}') & (7) \\ \lambda_{dr}' = L_{d2}' i_{dr}' + L_M (i_{ds} + i_{dr}') & (8) \end{cases}$$

donde:

v_{qs} : Transformación de Park de la tensión de alimentación, eje q.

v_{ds} : Transformación de Park de la tensión de alimentación, eje d.

R_1 : Resistor del bobinado del estator.

R_2' : Resistor del bobinado del rotor referido al estator.

i_{qs} : Transformación de Park de la corriente del estator, eje q.

i_{ds} : Transformación de Park de la corriente del estator, eje d.

ω : Velocidad del rotor.

λ_{ds} : Transformación de Park del flujo concatenado del estator, eje d.

λ_{qs} : Transformación de Park del flujo concatenado del estator, eje q.

v_{qr}' : Transformación de Park de la tensión del rotor referida al estator, eje q.

v_{dr}' : Transformación de Park de la tensión del rotor referida al estator, eje d.

i_{qr}' : Transformación de Park de la corriente del rotor referida al estator, eje q.

i_{dr}' : Transformación de Park de la corriente del rotor referida al estator, eje d.

ω_r : velocidad del marco de referencia.

L_M : Inductor de magnetización.

L_{d1} : Inductor de dispersión del estator.

L_{d2}' : Inductor de dispersión del rotor referido al estator.

Operando estos sistemas de ecuaciones, se obtienen las ecuaciones dinámicas del MAT, las cuales pueden ser representadas en forma circuital. Para representarlas se utilizó el programa de simulación de circuitos eléctricos PSIM. Por medio de componentes eléctricos y de control se representaron las ecuaciones dinámicas para los ejes D y Q que establece la Transformación de Park. Se dispone así de las ecuaciones que determinan el comportamiento dinámico de una MAT, simplificado al utilizar la transformación de Park al modelo del motor original.

Al realizar la simulación se utilizó el marco de referencia estacionario $\omega_r=0$.

A partir de las corrientes i_{qs} , i_{ds} , i_{qr} , i_{dr} , el inductor de magnetización L_M y el número de polos se puede calcular la cupla electromagnética que interviene en la ecuación electromagnética básica y permite resolver el régimen de funcionamiento dinámico:

$$T_{em} = J \frac{d\omega}{dt} + \omega B + T_m \quad (9)$$

donde:

T_{em} : Cupla electromagnética

T_m : Cupla mecánica.

J: momento de inercia

B: coeficiente de fricción viscosa

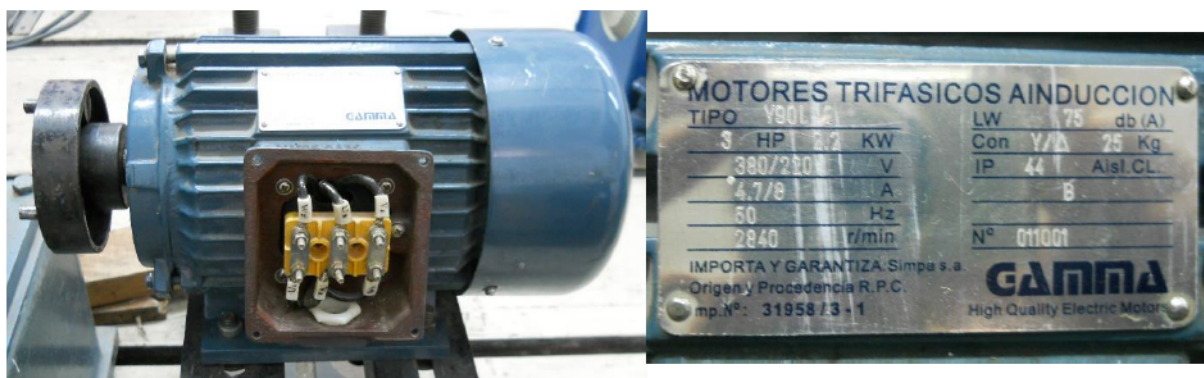
ω : velocidad radial del eje del MAT

También a partir de i_{qs} e i_{ds} se determinan las corrientes reales del estator.

Características del motor a estudiar

Se utilizó un motor trifásico de rotor de jaula de ardilla simple con las siguientes características indicadas en su chapa de identificación.

Potencia	3 HP	2,2 kW
Tensión	380 V Y	220 V Δ
Corriente	4,7 A Y	8 A Δ
Frecuencia	50 Hz	
Velocidad a plena carga	2840 rpm	



Vista del motor modelizado

Placa de identificación

Características del motor a estudiar

Para la evaluación de los parámetros del MAT se realizaron los ensayos de vacío, cortocircuito y la medición de las resistencias de los bobinados del inductor. Se determinaron las pérdidas por fricción y ventilación, como lo indica [2] [3] [4], las cuales fueron incluidas en el parámetro B que determina la cupla de fricción viscosa [5] dependiente de la velocidad del eje, ω ; al momento de inercia J se lo obtuvo de tablas de motores asíncronos trifásicos normalizados, de acuerdo a las características del MAT bajo estudio.

Utilizando un sistema de adquisición se pudieron medir las corrientes del estator del MAT en valor instantáneo, para realizar una comparación entre lo simulado y lo medido.

Resultados obtenidos

Las simulaciones y la mediciones se realizaron considerando que el motor opera sin carga en el eje, de modo que en la ecuación electromecánica básica (9) resulta la cupla mecánica nula y única "cupla resistente" es la de fricción.

Se analizaron las corrientes estáticas en el arranque, cuando se aplica plena tensión (nominal) al motor, lo cual se conoce como "arranque directo", y cuando se realiza un cambio de sentido de giro estando el motor conectado a plena tensión.

En la figura 2 se muestra la superposición de las corrientes medidas (traza azul) y las corrientes simuladas (traza verde) de las tres fases del MAT en el arranque.

En la figura 3 se muestran las corrientes medidas (traza azul) y las corrientes simuladas (traza verde) de las tres fases del MAT al invertir el sentido de marcha. Para efectuar el sentido de giro de rotación, se corta la alimentación de las 3 fases por un tiempo determinado (aproximadamente 20 ms) y luego se vuelve a conectar las tensiones pero intercambiando dos fases con respecto a las secuencia previa al cambio del sentido de giro. Este tiempo muerto se observa en la figura 3.

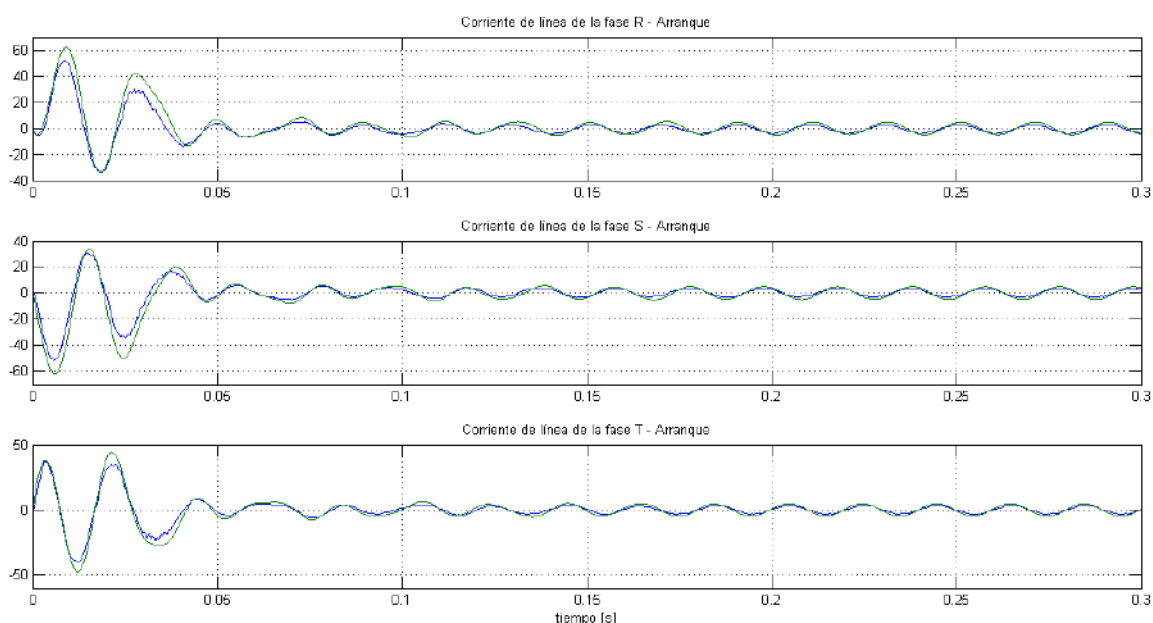


Fig. 2 - Corrientes en el arranque de las 3 fases – Verde: simulación, Azul: Adquisición

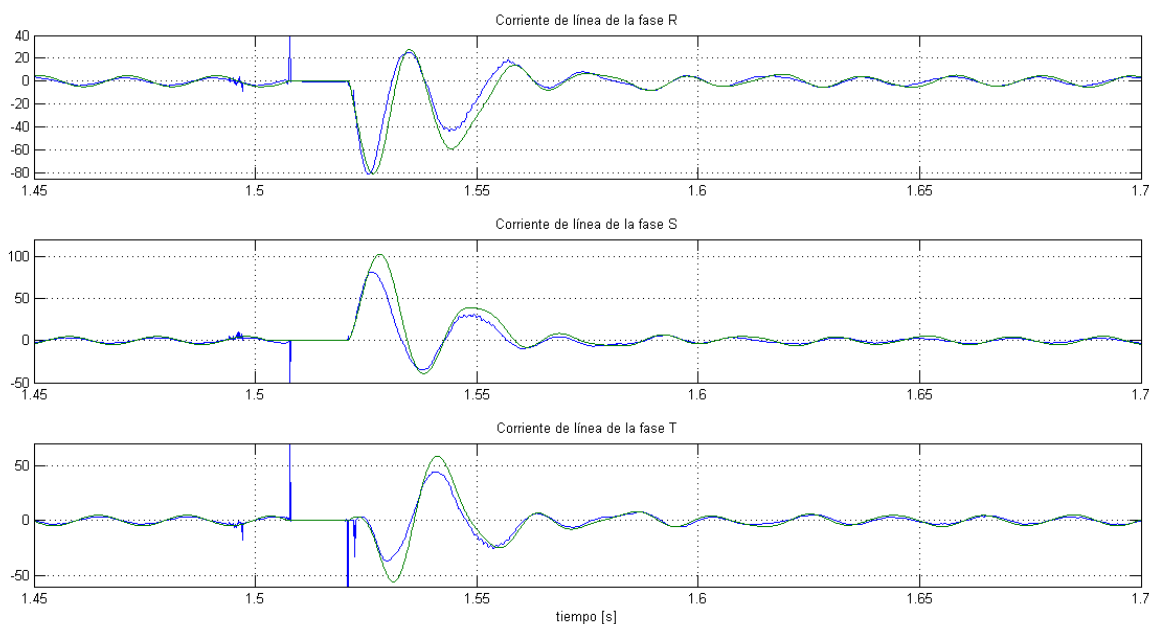


Fig. 3 - Corriente en el cambio del sentido de giro de las 3 fases – Verde: simulación, Azul: Adquisición

Conclusiones

Se estudió el régimen de funcionamiento transitorio de un MAT alimentado a tensión nominal y sin carga en el eje mediante simulación y medición de las corrientes del estator.

Ello se realizó para el arranque y la inversión del sentido de giro, comprobándose por inspección de las figuras respectivas una aceptable coincidencia de la variación temporal de la corriente simulada y las obtenidas de las mediciones del estator.

Para las simulaciones se emplearon programas de resolución de circuitos eléctricos/electrónicos uso general.

Agradecimientos

A los ingenieros Arrojo, Carlos y Nastta, Hernán del Laboratorio de Potencia LEME del Departamento de Electrotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

Bibliografía

- [1] Mora Jesús F., Máquinas Eléctricas, 5ta Ed, Mc Graw Hill, 2003.
- [2] IEEE Std 112 -2004 “Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”.
- [3] IEC 60034-1: 2010 “Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance”.
- [4] IEC 60034-2-1: 2007 “Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)”.
- [5] Ogata K., Dinámica de sistemas, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1987.
- [6] Krause P., et al, Analysis of electric machinery and drive system, 2da Ed, Wiley, 2002.
- [7] Vukosavic Slobodan N., Electrical Machines, Springer, 2013.