

DINÁMICA DE UN MOTOR ASINCRÓNICO DE GRAN TAMAÑO (LARGE MACHINE)

Julian Pérez M^{1*}, Alexander Cepeda Q¹

¹ Dpto. de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería UCV.

[*julian.perez@ucv.ve](mailto:julian.perez@ucv.ve), perezjulian16@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo, se estudia la dinámica de un motor asincrónico de gran tamaño, sometido a diversas perturbaciones. Inicialmente se muestra su comportamiento durante un arranque natural, luego se verá su evolución desde el régimen de operación estable (Régimen I) al Régimen II, que consiste en una reducción del 90% de la carga fijada en el arranque. Finalmente se analizará el cambio de la dinámica desde el Régimen I a un Régimen III que consiste de una pérdida del 15% de la tensión de alimentación. Se dispone de los datos nominales del motor, así como de los parámetros típicos del circuito equivalente de una máquina de este tipo. Para los efectos de la simulación, se mostrarán las curvas del Par, la velocidad, y corriente en el estator en función del tiempo,

Palabras clave: Máquinas grandes, Dinámica de un motor, Régimen Transitorio, Perturbaciones.

ABSTRACT

The dynamics of a large induction motor, subjected to various disturbances is studied in this paper. Shown at first his behavior for a natural starting then will their evolution from the stable operating regime (Regime I) to Regime II, which consists of a 90% of load reduction. Finally is analyzed the dynamics change from Regime I to Regime III consisting of a loss of 15% of the supply voltage. It has the rated motor data and typical parameters of the equivalent circuit of a machine of this type. For purposes of the simulation, are shown torque curves, velocity, and current in the stator as a function of time.

Keywords: Large Machines, Dynamics of an induction motor, Transitory, Disturbances

INTRODUCCIÓN

Durante los cambios en la condición de operación de una máquina existe energía atrapada tanto en los campos magnéticos como en la masa rotante. El convertidor debe adaptar esta energía desde el punto de operación inicial a las nuevas condiciones. El cambio desde un estado energético a otro se denomina transitorio de la máquina. El análisis de los procesos transitorios de las máquinas se puede dividir en dos tipos principales: Los transitorios electromagnéticos y los transitorios electromecánicos. Aun cuando el proceso transitorio es continuo, la existencia de constantes de tiempo bien diferenciadas permite realizar estas divisiones. [1]

Las constantes de tiempo mecánicas son generalmente muy lentas en máquinas de grandes dimensiones, cuando se comparan con las constantes de tiempo electromagnéticas. El análisis de transitorio electromagnético estudia el comportamiento de los flujos, enlaces de flujo, fuerzas electromotrices y tensiones de la máquina durante perturbaciones rápidas, considerando que la velocidad mecánica es prácticamente constante en todo el proceso. En los estudios transitorios electromecánicos se determina el comportamiento dinámico del sistema mecánico, utilizando valores medios de la potencia. Estos procesos están estrechamente interrelacionados, la separación es un tanto artificial, pero tiene el propósito de simplificar el análisis y la solución del problema. El desarrollo actual de las herramientas de cómputo posibilita la solución global del problema. Esto es de gran utilidad cuando el transitorio tiene constantes de tiempo electromagnéticas y electromecánicas del mismo orden de magnitud. [1]

Mediante el análisis transitorio electromagnético se evalúan las solicitaciones físicas que las diferentes perturbaciones pueden ocasionar sobre la máquina. Con los resultados obtenidos en estos estudios se ajustan los reguladores de la excitatriz y el sistema de protección. El análisis de los transitorios electromecánico determina los límites de estabilidad dinámica de las diferentes máquinas acopladas a la red eléctrica de potencia. Los estudios de estabilidad se utilizan para planificar la expansión de la red y con la finalidad de ajustar los reguladores de velocidad de la máquina motriz. [1]

Para analizar los transitorios de la máquina asincrónica se utiliza la transformada modificada de R.H. Park (transformada en coordenadas dq0 rotando en sincronismo). La matriz de transición directa de la transformación modificada de Park, se indica a continuación: [2]

$$[P(\theta_i)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta_i^-) & \sin(\theta_i^-) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta_i^+) & \sin(\theta_i^+) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{donde: } \theta_i^\pm = \theta_i \pm \frac{2\pi}{3} \quad (2)$$

Las variables expresadas en función de los ejes de referencia abc pueden ser referidos al sistema de ejes dq0; de forma que:

$$[f_{0dq}] = [P(\theta_i)]^{-1} \cdot [f_{abc}] \quad (3)$$

La máquina asincrónica seleccionada para el estudio corresponde a una máquina grande (large machine), cuya definición (de acuerdo a la traducción) se indica a continuación:

Una máquina grande de corriente alterna es: una máquina que tiene una potencia continua superior a la indicada como máquinas integrales o medianas, para la clasificación de velocidad sincrónica por encima de 450rpm, o una máquina que tiene una potencia continua superior a la dada en las definiciones de la norma MG 1-2006 que corresponden a máquinas de potencia fraccional o pequeñas, para velocidades sincrónicas nominales iguales o por debajo de 450rpm. [3]

El motor asincrónico bajo estudio tiene los siguientes datos nominales:

- NEMA=A
- Pares de polos: $p=3$
- Tensión nominal rms, de línea estator en estrella $V_n = 13.200V$
- Potencia nominal: 15.000hp
- Velocidad nominal del eje: 1.197rpm
- Constante de Inercia del sistema (según [3]): 2.236,205 kg. m^2
- La constante de inercia se obtuvo a través de una ecuación que sugiere la norma NEMA MG-1, por lo que este dato es teórico.

METODOLOGÍA

La metodología a utilizada para obtener, mediante simulación, el comportamiento dinámico de un motor de gran tamaño, sometido a perturbaciones, es la siguiente:

- Primero se fijan las condiciones iniciales de tensión y corriente para cada régimen de trabajo.
- Se plantea un sistema de 5 ecuaciones diferenciales, compuesto por las tres ecuaciones de tensión del estator, y las tres del rotor, que en componentes d y q se transforman en cuatro (4) ecuaciones (dos del estator y dos del rotor en $dq0$), más la ecuación mecánica del eje de la máquina.
- Para resolver las ecuaciones diferenciales se utilizó el método de Runge-Kutta de cuarto orden, modificado [función $Rkadapt(i,t1,t2,npoints,D(t,i))$]; donde la variable i representa el vector de las variables a resolver, que en este caso son las componentes d y q de corriente, ambas del estator y rotor, así como la velocidad de rotación w_{eje} . Los puntos $t1$ y $t2$ definen el dominio de tiempo en que se evaluará la solución numérica del sistema de ecuaciones; siendo $npoints$ el número de muestras generadas por la solución en referencia. El vector $D(t,i)$ posee como elementos las primeras derivadas de las variables incógnitas, siendo t la variable independiente e i la variable a resolver.
- Se analizan cada una de las perturbaciones, tomando como base el arranque del motor en condiciones naturales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado del comportamiento dinámico de la máquina bajo estudio, a partir del estado estable que sigue a un arranque natural a tensión y frecuencia nominal y con una carga del tipo cuadrático.

- **Régimen I: Arranque del motor a tensión nominal y carga con característica de par del tipo cuadrático:**

Según [4], la impedancia de entrada de la máquina de inducción es esencialmente la resistencia del estator y su reactancia de fuga en serie con la resistencia del rotor y su reactancia de fuga. En consecuencia, con tensión nominal aplicada, la corriente de arranque es grande, en algunos casos en el orden de 10 veces el valor nominal. El par electromagnético instantáneo, sigue a la tensión aplicada en el estator, y varía a 60Hz sobre un valor promedio positivo. Las variaciones en el par instantáneo decaen debido a la compensación transitoria en las corrientes del estator. Aunque el desplazamiento en cada una de las corrientes del estator depende del valor de las tensiones de la fuente en el momento del arranque, el par instantáneo es independiente de los valores iniciales de la fuente equilibrada de tensiones ya que la máquina es simétrica. Las corrientes de las máquinas varían durante el período transitorio. Esto se debe a la interacción de los transitorios eléctricos entre el estator y el rotor.

El resultado de la simulación, arroja las siguientes gráficas:

- **Par del motor en arranque natural con carga de tipo cuadrática:**

En el caso bajo estudio, el comportamiento del par electromagnético es como se describe en [4], con una variación en el par instantáneo sobre un promedio positivo, llegando a tener valores máximos de $T_{em} = 433.351N.m$ y valores mínimos de $T_{em} = -4.905N.m$. El tiempo en el que el par electromagnético se iguala al par de la carga se ubica en aproximadamente 2,8s, como se aprecia en la Figura 1. Este tiempo se consigue variando el t_{max} de la ecuación de Runge Kutta de cuarto orden, hasta que el par electromagnético se hace igual al par de la carga.

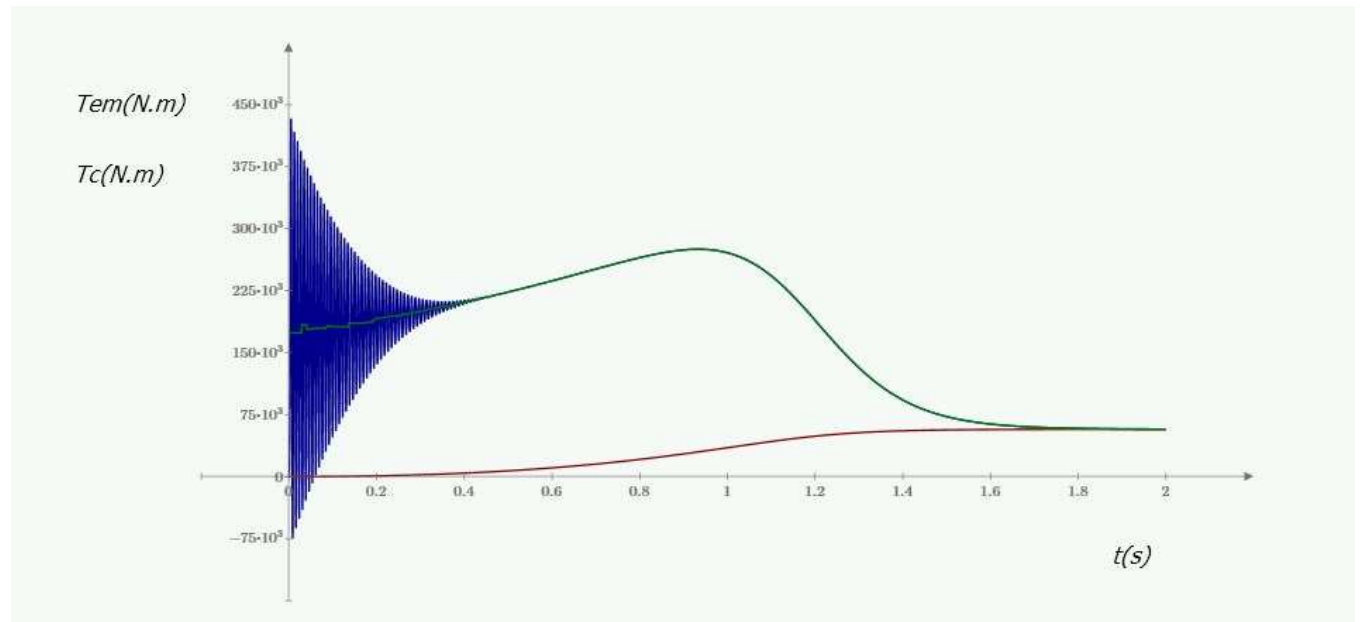


Figura 1. Evolución del Par en función del tiempo.

- **Velocidad del motor en el arranque natural:**

La velocidad final se alcanza en un tiempo aproximado de 1,3s. Ver Figura 2.



Figura 2. Evolución de la Velocidad en función del tiempo.

- **Corriente en el estator del motor en arranque natural:**

La máxima corriente durante el arranque se ubicó en $I_{1f}=4.343A$, que representa 5,66 veces la corriente nominal ($I_{nom}=766,658A$). Ver Figura 3.

Corriente del estator: i_{lf}

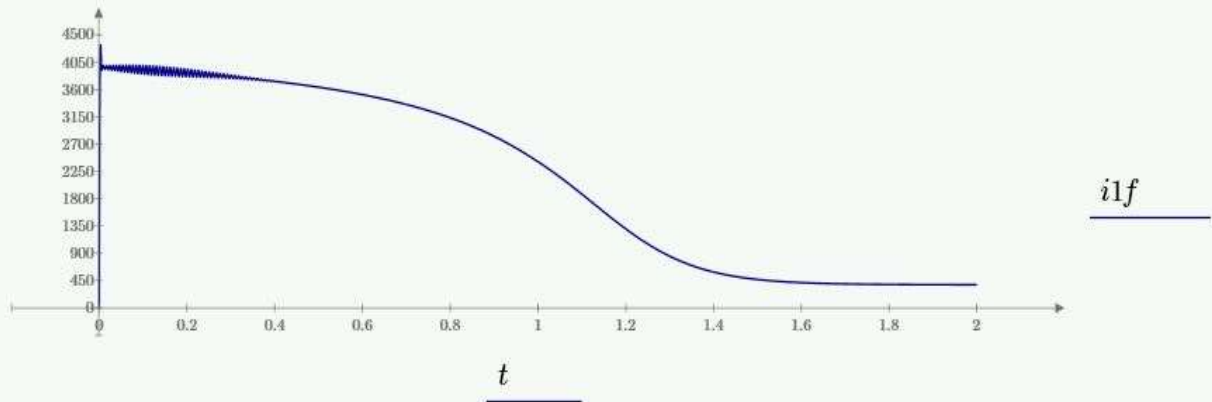


Figura 3. Evolución de la Corriente del Estator en función del tiempo.

- **Régimen II: Cambio o reducción de la carga:**

Para el caso que se está estudiando, el par de la carga sufre una disminución del 90% de su valor inicial, con lo que se establece un nuevo punto de funcionamiento. Se espera que la dinámica de la máquina responda a la variación de la velocidad que experimenta el motor.

- **Par del motor con disminución del 90% de la carga:**

El par electromagnético disminuye y se iguala al par de la carga en aproximadamente 1,2s. Este tiempo se consigue aplicando el procedimiento descrito en el punto anterior. El valor de dicho par final es de $T_{em}=T_{carga}=5.974N.m$.

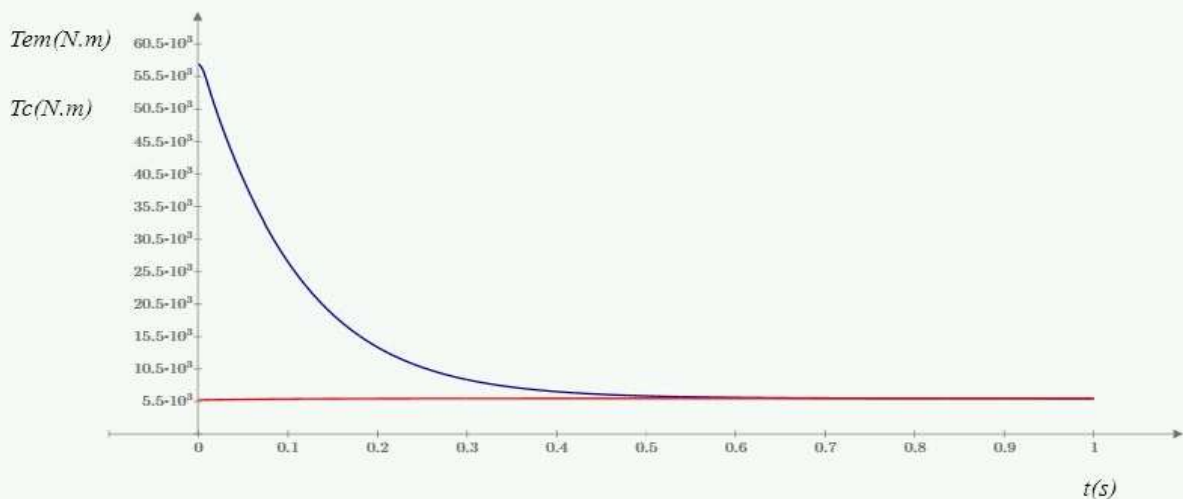


Figura 4. Evolución del Par desde el Régimen I al Régimen II.

- **Velocidad del motor con disminución del 90% de la carga:**

La velocidad de la máquina se incrementa de 1.173,364rpm a 1.197,409rpm (un incremento de 2,05%).

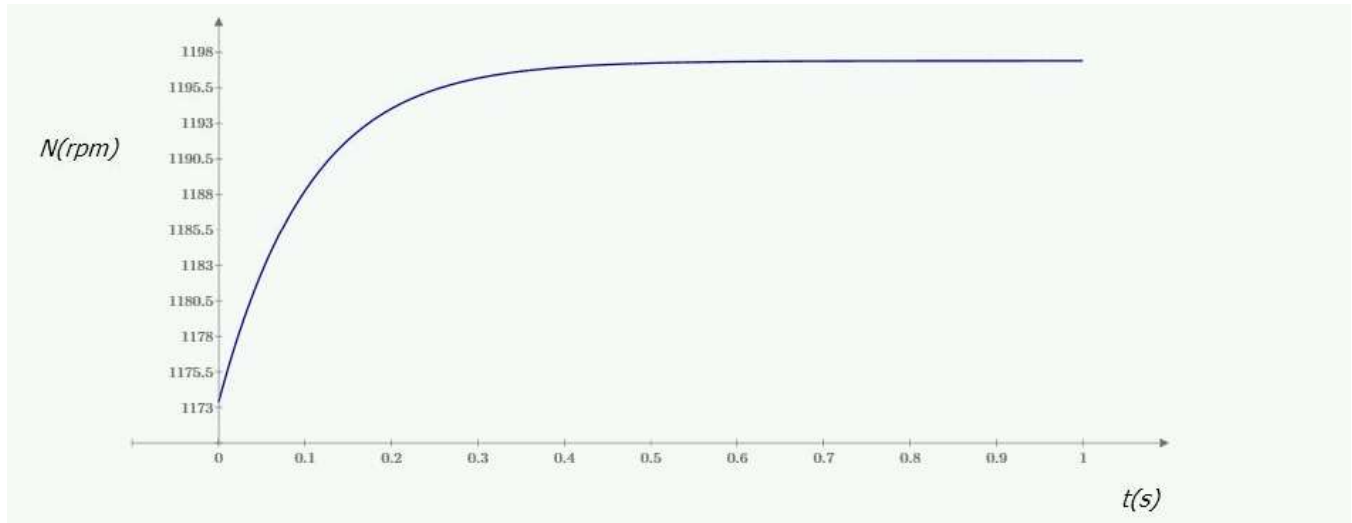


Figura 5. Evolución de la Velocidad, desde el Régimen I al Régimen II.

- **Corriente en el estator con disminución del 90% de la carga:**
La corriente del estator varía de $I_{1f}=380,98A$ a $I_{1f}=183,182A$ (reducción del 51,9%).

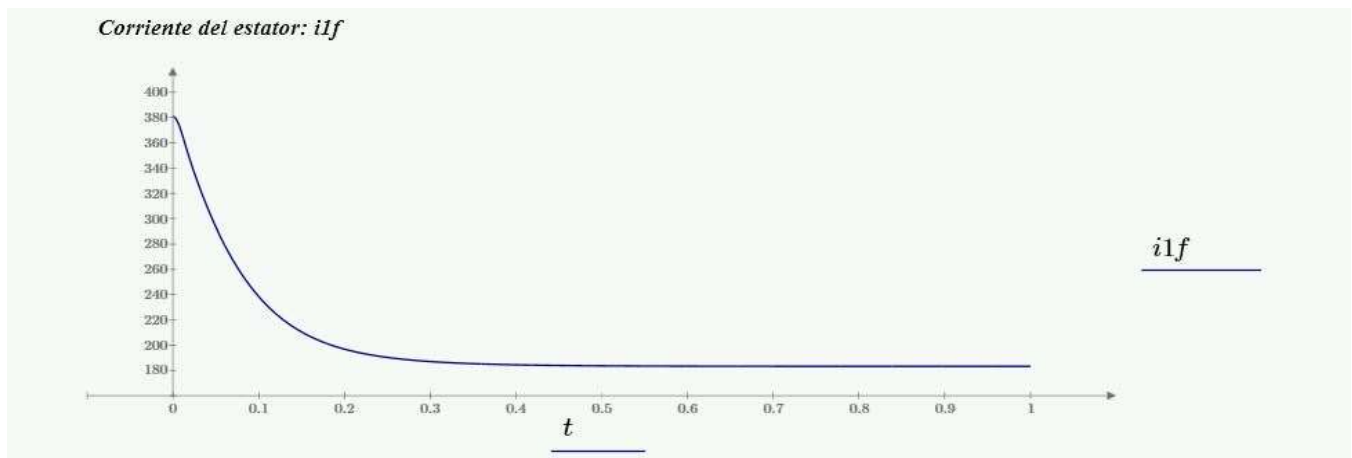


Figura 6. Evolución de la Corriente del estator, desde el Régimen I al Régimen II.

- **Régimen III: Disminución de un 15% de la tensión de alimentación:**
Según [5], las caídas de tensión y su impacto en las cargas de los clientes constituyen el problema de calidad de energía de mayor prevalencia en los sistemas de distribución. Las caídas de tensión pueden provocar el disparo de las protecciones del cliente y el cierre de las líneas de producción que den lugar a la pérdida de producción y procedimientos costosos de reiniciar. Equipos sensibles a las caídas de tensión incluyen: procesos controlados por computador, accionamientos de velocidad variable (VSD) y motores de inducción.
Las caídas de tensión se deben principalmente a corto circuitos en el sistema. Su magnitud depende del nivel de cortocircuito de la red de alimentación y la proximidad de la falla a la barra afectada. A medida que la tensión de alimentación del motor de inducción disminuye, la velocidad del motor disminuye. Dependiendo del tamaño y la duración del hueco de tensión, la velocidad del motor puede recuperarse a su valor normal mientras se recupera la amplitud del voltaje. Si la magnitud del hueco

de tensión y/o duración es superior a sus límites permitidos, el motor puede detenerse y se saca del sistema por medio de su protección de rotor bloqueado.

De acuerdo con [6], asumiendo que la caída de tensión sea debida a una falla trifásica cerca del motor, lo cual es válido para muchas plantas, la energía eléctrica no puede entrar ni salir del motor. Es evidente que la corriente todavía puede fluir, tanto en el estator como en el rotor, por lo tanto se produce par de torsión. La energía almacenada en el campo magnético puede ser disipada, ya sea como energía mecánica o en forma de calor debido a las pérdidas de cobre del motor. Como hay una falla aplicada, hay una gran corriente transitoria, pero con un componente DC. Dependiendo del nivel de caída de la tensión, el pico de corriente por el efecto combinado puede llegar a ser de hasta ocho veces la corriente r.m.s. nominal. Ambas componentes, la AC y la DC decaen rápidamente con una constante de tiempo que se puede aproximar a la suma de las inductancias de fuga del estator y el rotor en serie con las resistencias del estator y el rotor. Típicamente el flujo decaerá a menos del 30% del flujo nominal en 5 a 6 ciclos. Dado que este transitorio es dominado por el decaimiento en el flujo principal, la carga de la máquina solamente tiene un efecto pequeño en el tamaño de los transitorios. Asociado con el transitorio de corriente, hay un par transitorio con una característica inicial de un gran pulso negativo de una magnitud típica de 8pu. Este par impulsivo alcanza su máximo en cerca de dos ciclos, pero decae rápidamente.

Para los efectos de esta simulación, sólo se considera la caída en un 15% de la tensión de alimentación, con una duración suficiente para que se establezcan las condiciones de operación del motor.

-Par del motor para una disminución del 15% de la tensión de alimentación:

Para la máquina bajo estudio se puede observar un par transitorio con un gran pulso inicial negativo de una magnitud de $T_{em_min} = -24.267 \text{ N.m}$ que representa una disminución del 142,9% respecto al par inicial, seguido de un impulso positivo que llega a un valor de $T_{em_máx} = 67.986 \text{ N.m}$ (18,5% por encima del par antes de la perturbación). Las oscilaciones decaen rápidamente (en menos de 0,1s) y el par electromagnético se iguala al par de la carga en aproximadamente 2,1s (procedimiento ya descrito anteriormente).

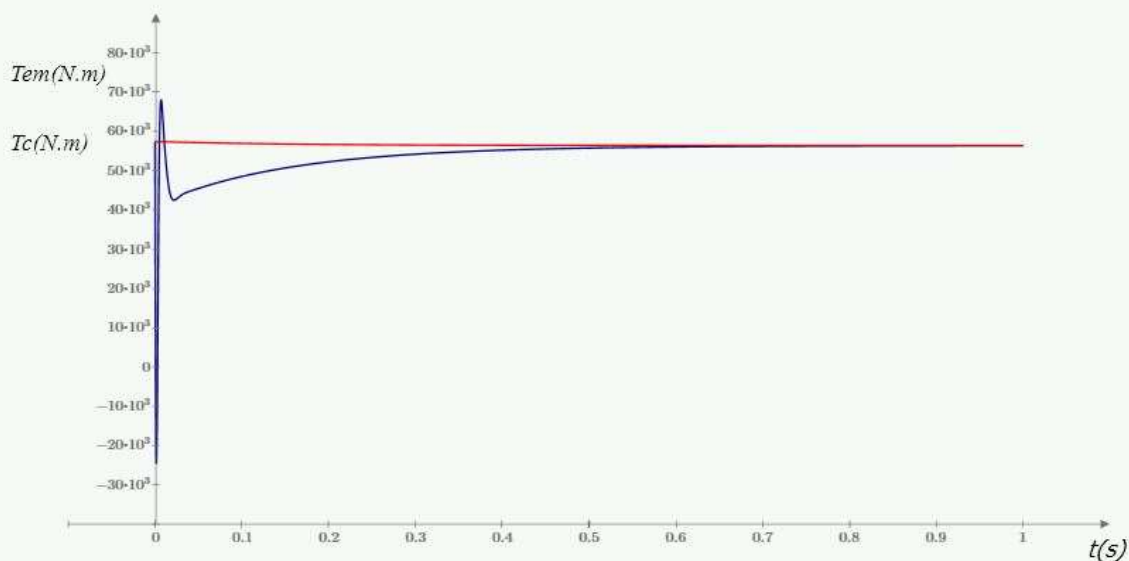


Figura 7. Evolución del Par desde el Régimen I al Régimen III.

- **Velocidad del motor para una disminución del 15% de la tensión de alimentación:**
La velocidad se reduce en un 0,914% con respecto al valor de estado estable. Se puede observar una pequeña oscilación en la velocidad que depende de la magnitud de la disminución de la tensión.

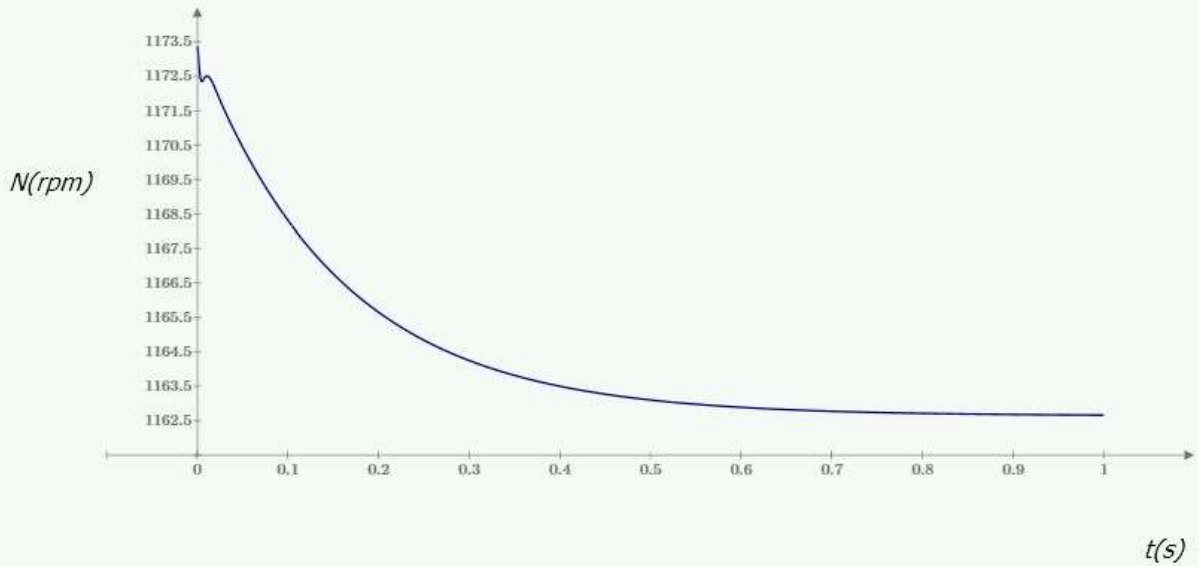


Figura 8. Evolución de la Velocidad, desde el Régimen I al Régimen III.

- **Corriente en el estator para una disminución del 15% de la tensión de alimentación:**
Se puede observar una amplia oscilación en la corriente del estator, que partiendo de una corriente inicial (antes de la perturbación) de $I_{lf_ini}=380,98A$, pasa por un mínimo de $I_{lf_min}=75,629A$ y luego un máximo de $I_{lf_máx}=478,081A$. Las variaciones en la corriente del estator se presentan en la misma secuencia de las variaciones del par. Ver Figura 9.

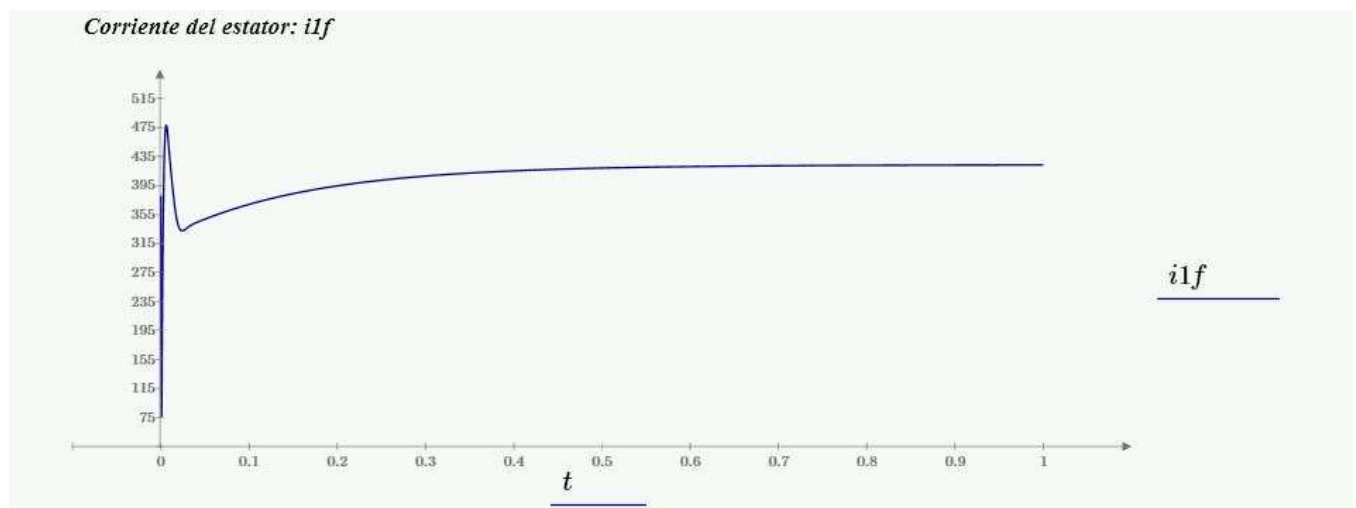


Figura 9. Evolución de la Corriente del estator, desde el Régimen I al Régimen III.

CONCLUSIONES

La dinámica de un motor considerado grande, según NEMA MG-1, con una gran inercia, influye en la cantidad de oscilaciones que se observan en la evolución del par desde la condición de arranque, hasta su establecimiento en régimen estacionario.

La gran inercia también influye en la reacción que se observa en el resto de las variables, como la velocidad y la corriente, para alcanzar su estado de equilibrio.

Los resultados observados en las gráficas obtenidas de las simulaciones, concuerda con las descripciones que realizan autores como [4], a pesar que sus apreciaciones se basan en máquinas de menor tamaño, por lo que se puede concluir, que dicho comportamiento se presenta en todos los tipos de tamaño de motor que describe la NEMA MG-1.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General*, Caracas: EQUINOCCIO, 2007.
- [2] A. Cepeda Q., «*Modelación del Motor de Inducción en Componentes YH KU para su Aplicación en Control de Par por Orientación de Campo*,» Caracas, 2001.
- [3] N. MG-1, «*Large Machines-Induction Machines*,» de NEMA MG-1. Motors And Generators, Rosslyn, VA, NEMA, 2006, pp. 8, Section III. Part 20.
- [4] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, IEEE Power Engineering Society, 2002.
- [5] A. Leira, P. Nunes, A. Morched y M. T. Correia de Barros, «*Induction Motor Response to Voltage Dip*,» de International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003.
- [6] M. McCulloch, «*The Effect of Voltage Dips On Induction Motors*,» Power Quality, n° 3, pp. 7, Part 20, Sin fecha.