

MODELING AND SIMULATION OF THE TRANSIENT PHENOMENA IN THE INDUCTION MOTOR POWER LINE DISCONNECTION

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LA DESCONEXIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCION

PhD. Aldo Pardo García, Msc. Jorge Luis Díaz R, 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

{apardo13, jdiazcu, amunozm}@unipamplona.edu.co

Abstract: This paper deals with the mathematical modeling and the simulation of the transitory response in the power line disconnection process of the induction motors. The equations that describe the transitory phenomena were included in the professional software Simulink[®] achieving the simulation of this transient process.

Resumen: En este trabajo se realiza la modelación matemática y la simulación de las respuestas transitorias en el proceso de desconexión de la red de alimentación que ocurre en los motores de inducción. Las ecuaciones que describen los fenómenos transitorios se incluyeron en el software profesional Simulink[®] logrando la simulación de este proceso transitorio.

Keywords: Induction motor, Transient process, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática que rodea la calidad del servicio eléctrico reviste una gran complejidad tecnológica. Las eventuales interrupciones en el suministro eléctrico hasta las de algunos pocos segundos, pueden tener consecuencias especialmente negativas para el usuario. Estos cambios de las tensiones de las redes eléctricas provocan la ocurrencia de procesos transitorios en las máquinas eléctricas, así como en las operaciones de emergencia para mantener las tensiones y por ende en los regímenes continuos de trabajo.

Son de gran utilidad el estudio de estos procesos

transitorios pues muchos de ellos pueden acarrear graves difusiones en la industria. En nuestro trabajo nos trazamos los objetivos de modelar y simular el proceso transitorio que ocurre en el motor asincrónico en la desconexión de la red de alimentación.

2. PROCESOS TRANSITORIOS EN LAS MÁQUINAS ASINCRÓNICAS

El análisis de los procesos transitorios en las máquinas asincrónicas resulta más cómodo efectuarlo en forma de expresiones complejas con ayuda del sistema de ecuaciones de las tensiones del rotor, escritas en los ejes d, q

$$\tilde{U}_2 = R_2 \tilde{I}_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} \quad (1)$$

$$\tilde{U}_1 = R_1 \tilde{I}_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} + j\omega \Psi_1 \quad (2)$$

Las ecuaciones de las tensiones del estator escritas en los ejes α y β

$$\tilde{U}_1 = R_1 \tilde{I}_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} \quad (3)$$

$$\tilde{U}_2 = R_2 \tilde{I}_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} - j\omega \tilde{\Psi}_2 \quad (4)$$

En caso general, en el plano complejo que gira a la velocidad arbitraria ω_0 .

$$\tilde{U}_1 = R_1 \tilde{I}_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} + j\omega_0 \tilde{\Psi}_1 \quad (5)$$

$$\tilde{U}_2 = R_2 \tilde{I}_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_0 - \omega) \tilde{\Psi}_2 \quad (6)$$

Donde:

- U_1, U_2 Tensiones del estator y rotor.
- I_1, I_2 Corrientes del estator y rotor.
- Ψ_1, Ψ_2 Flujos del estator y rotor.
- ω Velocidad angular del rotor.

Este sistema de ecuaciones junto con las ecuaciones para las tensiones de secuencia cero U_{01} y U_{02} .

$$\begin{aligned} u_{01} &= R_1 i_{01} + d\psi_{01}/dt \\ u_{02} &= R_2 i_{02} + d\psi_{02}/dt \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{1A\Sigma} &= \Psi_{1A} + \Psi_{01} & \Psi_{1B\Sigma} &= \Psi_{1B} + \Psi_{01} \\ \Psi_{1C\Sigma} &= \Psi_{1C} + \Psi_{01} & & \\ \Psi_{2a\Sigma} &= \Psi_{2a} + \Psi_{02} & \Psi_{2b\Sigma} &= \Psi_{2b} + \Psi_{02} \\ \Psi_{2c\Sigma} &= \Psi_{2c} + \Psi_{02} & & \end{aligned} \quad (8)$$

Describen de forma exhaustiva (dentro de los límites de las suposiciones adoptadas) los procesos simétricos y no simétricos establecidos y transitorios en las máquinas asincrónicas y se pueden emplear en lugar del sistema de ecuaciones para las tensiones de las fases del devanado del estator y rotor.

Los coeficientes de las corrientes ($R_1, R_2, L_1, L_2, L_{12m}, L_{01}, L_{02}$) en las ecuaciones de las tensiones en los ejes $\alpha, \beta, 0$, ó $d, q, 0$, se pueden considerar constantes si se admiten las siguientes condiciones:

- Se desprecian la saturación y la histéresis de las partes de acero del circuito magnético.
- No se considera la existencia de ranuras y dientes.

- Se desprecian los componentes armónicos temporales superiores de las corrientes.
- Se desprecian las pérdidas magnéticas y auxiliares de las corrientes en torbellinos en los conductores.
- Los enrollados de las tres fases del estator son simétricos y se encuentran a 120° eléctricos en el espacio.
- El campo magnético a través del entrehierro se distribuye sinusoidalmente.
- Se supone una máquina de 2 polos siendo los resultados aplicables a una de n polos.

En el análisis de los procesos transitorios de las variaciones eléctricas asincrónicas podemos plantear que alteran la frecuencia y el voltaje del estator; usando un sistema de coordenadas girando a velocidad sincrónica ω_k , generalmente igual a la velocidad del campo magnético rotatorio ω_0 y para un número de pares de polos igual a la unidad:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (9)$$

Siendo:

- ω_1 Velocidad sincrónica.
- f_1 Frecuencia de la red.

Antes de resolver el sistema de ecuaciones complejas de las tensiones, escritas en unos u otros ejes, es necesario transformar estos ejes tanto las magnitudes de fases, determinadas por las condiciones iniciales, como los valores que varían, debido a la acción del proceso transitorio. Este paso puede efectuarse con ayuda de las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 &= i_{1\alpha} + j i_{1\beta} \\ \tilde{I}_2 &= i_{2d} + j i_{2q} \\ \tilde{I}_{2(\alpha,\beta)} &= \tilde{I}_2 \cdot e^{j\alpha} = (i_{2d} + j i_{2q}) \cdot e^{j\alpha} = i_{2\alpha} + j i_{2\beta} \\ \tilde{I}_{1(d,q)} &= \tilde{I}_1 \cdot e^{-j\alpha} = (i_{1\alpha} + j i_{1\beta}) \cdot e^{-j\alpha} = i_{1d} + j i_{1q} \\ \tilde{I}_1 &= \tilde{I}_{1(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\alpha_0} \\ \tilde{I}_2 &= \tilde{I}_{2(d,q)} \cdot e^{-j(\alpha_0 - \alpha)} \end{aligned} \quad (10)$$

Donde:

$I_{1(\alpha,\beta)}$ es la función compleja de la corriente del estator en el propio plano complejo α, β , y $I_{2(d,q)}$ la función compleja de la corriente del rotor en el propio plano complejo d, q .

Según las funciones complejas de las corrientes halladas como resultado de la solución, y recurriendo a la transformación inversa se determinan las corrientes de las fases. Por ejemplo, si las corrientes se han calculado en el sistema de ejes α , β , 0 y es iguales a:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_1 &= i_{1\alpha} + j i_{1\beta} \\ \tilde{I}_{2(\alpha,\beta)} &= i_{2\alpha} + j i_{2\beta}\end{aligned}\quad (11)$$

Entonces:

$$\begin{aligned}i_{1A} &= \Re e [\tilde{I}_1] \\ i_{1B} &= \Re e [\tilde{I}_1 \cdot a^2] \\ i_{1C} &= \Re e [\tilde{I}_1 \cdot a]\end{aligned}\quad (12)$$

$$\begin{aligned}i_{2a} &= \Re e [\tilde{I}_{2(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\alpha}] \\ i_{2b} &= \Re e [\tilde{I}_{2(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\alpha} \cdot a^2] \\ i_{2c} &= \Re e [\tilde{I}_{2(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\alpha} \cdot a]\end{aligned}\quad (13)$$

En la mayoría de los procesos transitorios el rotor de la máquina asincrónica se cortocircuita y la tensión en los bornes de su devanado trifásico es igual a cero ($U_2=0$). Si en el circuito del devanado del rotor se conecta un sistema simétrico de resistencias óhmicas e inductancias, entonces, agregando estas resistencias óhmicas a las propias resistencias óhmicas del rotor y a las inductancias de dispersión del rotor, se puede considerar que la tensión en los bornes del devanado del rotor sigue siendo igual a cero ($U_2=0$).

La descripción matemática expuesta anteriormente puede ser extendida a las máquinas asincrónicas con devanado en jaula del rotor. Para esto, es suficiente reemplazar el devanado polifásico en jaula del motor por otro trifásico equivalente, con los mismos datos del enrollado que el devanado del estator, y tomar los parámetros de este devanado iguales a los parámetros del devanado en jaula reducidos al devanado del estator.

Al investigar los procesos transitorios en los que la velocidad de variación de la frecuencia de rotación son conmensurable con la velocidad del cambio de las magnitudes eléctricas (es decir, con los procesos denominados electromecánicos) las ecuaciones complejas de las tensiones, escritas en uno u otros ejes, deben examinarse conjuntamente con las ecuaciones del movimiento mecánico rotacional del rotor.

$$M_m \pm M_c = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (14)$$

Donde:

- M_m Momento Electromagnético motor.
- M_c Momento Electromagnético de la carga.
- Ω Velocidad angular del rotor.
- J Momento de Inercia del motor y la carga.

El momento electromagnético y las ecuaciones de movimiento se calculan con ayuda del momento electromagnético por medio de las corrientes componentes y los flujos concatenados en los ejes d , q y en los ejes α , β .

$$\begin{aligned}M &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Im m [\tilde{\Psi}_2 \cdot \tilde{I}_2^*] = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{2q} i_{2d} - \Psi_{2d} i_{2q}) \\ M &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Im m [\tilde{\Psi}_1 \cdot \tilde{I}_1^*] = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \Psi_{1\beta} i_{1\alpha})\end{aligned}\quad (15)$$

Donde:

- $\Im m$ Operador Imaginario.
- p Pares de polos de la máquina.
- $*$ Complejo conjugado.

Ecuaciones de la máquina por unidad:

$$\begin{aligned}\tilde{U}_{1(n)} &= R_1 \cdot \vec{i}_{1(n)} + \frac{d\tilde{\Psi}_{1(n)}}{dt} + j \cdot \omega_n \cdot \Psi_{1(n)} \\ \tilde{U}_{2(n)} &= R_2 \cdot \vec{i}_{2(n)} + \frac{d\tilde{\Psi}_{2(n)}}{dt} + j \cdot (\omega_n - \omega_2) \cdot \Psi_{2(n)}\end{aligned}\quad (16)$$

3. PROCESOS TRANSITORIOS PARA UN DEVANADO ABIERTO DEL ESTATOR

Supongamos que antes de ser desconectada la máquina funcionaba en el régimen establecido con una velocidad angular del rotor ω y una frecuencia de la red ω_l . Cuando $t=0$ tiene lugar la desconexión simultánea de todas las fases del devanado del estator de la red y la corriente del estator del régimen estable precedente $I_{1(t=0)}$ con suma rapidez (durante el tiempo que arde el arco entre los contactos, que desconectan la red del devanado del estator) se reduce a cero.

Considerando que en este intervalo de tiempo el devanado en jaula del rotor es superconductor, y aplicándole al mismo el principio de constancia de los flujos concatenados, llegamos a la conclusión de que el flujo concatenado del rotor $\Psi_{2 \text{ inic}} = L_2 I_{2 \text{ inic}}$ después de que desaparece la corriente del estator permanece igual que en el régimen estable precedente para $t=0$, cuando él era igual a:

$$\Psi_{2(t=0)} = L_2 I_{2(t=0)} + L_{12} I_{1(t=0)} \quad (17)$$

Donde

$I_{2(t=0)}$ es la corriente del rotor del régimen estable precedente.

Estos flujos concatenados pueden ser expresados en cualquier sistema de ejes según:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_1 &= L_1 \tilde{I}_1 + L_{12m} \tilde{I}_2 \\ \tilde{\Psi}_2 &= L_2 \tilde{I}_2 + L_{12m} \tilde{I}_1 \end{aligned} \quad (18)$$

Además, de a partir de aquí en adelante, con el fin de simplificar la escritura de la inductancia de inducción mutua L_{12m} se designa L_{12} sin el índice m . De la condición $\psi_{2mic} = \psi_{2(t=0)}$ hallamos la corriente del rotor después de que ha desaparecido la corriente del estator

$$\tilde{I}_{2mic} = \frac{\tilde{\Psi}_{2(t=0)}}{L_2} = \tilde{I}_{2(t=0)} + K_2 \tilde{I}_{1(t=0)} \quad (19)$$

Donde $k_2 = L_{12}/L_2$, es el coeficiente de acoplamiento del rotor.

El proceso transitorio ulterior se reduce a la extinción de la corriente I_2 , cuyo valor inicial es igual a I_{2mic} . Por cuanto el tiempo en que arde el arco es muy breve, puede considerarse que este proceso se inicia cuando $t=0$. La corriente I_2 se determina a partir de la ecuación para el devanado en jaula del rotor, con el devanado del estator abierto, es decir, para $I_1 = 0$; $U_2 = 0$. Ecuación del rotor.

$$\tilde{U}_2 = R_2 \cdot \tilde{I}_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} + j \cdot (w_0 - w) \cdot \tilde{\Psi}_2 \quad (20)$$

En un sistema de ejes que gira con una velocidad arbitraria w_0 :

$$R_2 \cdot \tilde{I}_2 + [p + j \cdot (w_0 - w)] \cdot \tilde{\Psi}_2 = 0 \quad (21)$$

Donde:

$$\tilde{\Psi}_2 = L_2 \tilde{I}_2 \quad (22)$$

La solución de esta ecuación diferencial homogénea es $I_2 = C e^{p_0 t}$. El coeficiente de amortiguamiento p_0 es la raíz de la ecuación característica correspondiente.

$$[p + j \cdot (w_0 - w)] + \frac{1}{T_{20}} = 0 \quad (23)$$

De donde:

$$p_0 = -\frac{1}{T_{20}} - j \cdot (w_0 - w) \quad (24)$$

Donde $T_{20} = L_2/R_2$ es la constante de tiempo del devanado del rotor para el devanado abierto del estator.

La constante de integración C se determina de la condición inicial para $t = 0$.

$$I_{2mic} = C e^{p_0 t} = C \quad (25)$$

Definitivamente, el complejo resultante de la corriente del rotor se expresa de la forma.

$$\tilde{I}_2 = \left(\tilde{I}_{2mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \right) \cdot e^{-j(w_0 - w)t} \quad (26)$$

El sentido físico del mismo será más comprensible si se emplea el sistema de ejes d, q que giran con una velocidad del rotor $w_0 = w$. En los ejes del rotor el complejo $\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2mic} e^{-\frac{t}{T_{20}}}$ se amortigua con la constante de tiempo T_{20} , quedando inmóvil con relación al rotor. El complejo resultante I_2 corresponde al sistema de corrientes amortiguadas aperiódicamente en las fases del rotor:

$$\begin{aligned} i_{2a} &= i_{2a.mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \\ i_{2b} &= i_{2b.mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \\ i_{2c} &= i_{2c.mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \end{aligned} \quad (27)$$

Donde:

$$\begin{aligned} i_{2a.mic} &= \Re e \left[\tilde{I}_{2.mic} \right] \\ i_{2b.mic} &= \Re e \left[\tilde{I}_{2.mic} \cdot a^2 \right] \\ i_{2c.mic} &= \Re e \left[\tilde{I}_{2.mic} \cdot a \right] \end{aligned} \quad (28)$$

Son los valores iniciales de las corrientes.

En los ejes del estator α, β la velocidad angular es $w_0 = 0$, la función compleja resultante de la corriente del rotor es:

$$\tilde{I}_2 = \left(\tilde{I}_{2mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \right) \cdot e^{jw t} \quad (29)$$

Esta I_2 gira con la velocidad del rotor w , por cuanto precisamente con esta velocidad se traslada con respecto al estator la fmm., generada por las corrientes amortiguadas aperiódicamente en las fases del rotor.

Según:

$$\tilde{U}_1 = R_1 \cdot \tilde{I}_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} + j \cdot w_0 \cdot \tilde{\Psi}_1 \quad (30)$$

El campo de las corrientes del rotor, escrito en los ejes α , β , es decir, cuando $w_0=0$, induce en el devanado abierto del estator la tensión.

$$\tilde{U}_1 = + \frac{\partial \tilde{\Psi}_1}{\partial \tau} = \left(\tilde{U}_{1mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \right) \cdot e^{jw\tau} \quad (29)$$

Donde:

$$\tilde{\Psi}_1 = L_{12} \tilde{I}_2 = L_{12} \left(\tilde{I}_{2mic} \cdot e^{-\frac{t}{T_{20}}} \right) \cdot e^{jw\tau}; \quad \tilde{\Psi}_{1mic} = L_{12} \tilde{I}_{2mic} \quad (30)$$

$$U_{1mic} = (jw - \frac{1}{T_{20}}) \cdot \tilde{\Psi}_{1mic} \approx jw \tilde{\Psi}_{1mic} \quad (31)$$

Esta tensión varía con una velocidad angular del rotor igual a w , y su amplitud se amortigua con la constante del tiempo T_{20} .

4. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE INDUCCION

Existe un método de cálculo que permite la obtención de los parámetros de la máquina asincrónica a partir de los datos de chapa y la capacidad de sobrecarga nominal, es decir, la relación entre el par máximo y el nominal. A continuación describiremos este procedimiento:

Se tomaran como datos iniciales los siguientes:

- Voltaje nominal de fase: U_n (V)
- Corriente nominal: I_n (A)
- Potencia nominal: P_n (W)
- Pares de polos: P
- Factor de potencia: $\cos \varphi$
- Frecuencia nominal: f_n (Hz)
- Velocidad sincrónica: N_s (rpm)
- Velocidad nominal: N_n (rpm)
- Corriente de arranque: I_{arr} (A)
- Momento máximo: M_{max} (Kgfm)

En este punto debe recordarse que la potencia no varía con respecto al número de pares de polos de la máquina, y de acuerdo a la teoría unificada se tomaran los valores de los pares, así como de la velocidad, para $p = 1$.

Se determina la potencia eléctrica:

El deslizamiento nominal: $S_n = (n_s - n_n) / n_s$
 Potencia mecánica: $P_{mecn} = P_{2n} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad}$
 Potencia electromagnética: $P_{emn} = P_{mecn} / (1 - S_n)$
 Las pérdidas totales: $\Sigma P_{erd} = P_{1n} - P_{2n}$
 Las pérdidas del cobre: $\Delta P_{cob} = S_n \cdot P_{emn}$
 Potencia de entrada al motor: $P_{1n} = \sqrt{3} U_n \cdot I_n \cos \varphi$

Potencia mecánica de salida:

$P_{2n} = P_{2n} (Kw) \cdot (1000)$
 Pérdidas adicionales $\Delta P_{ad} \approx 0.5\% P_{1n}$
 Pérdidas mecánicas $\Delta P_{mec} \approx 0.7\% P_{1n}$
 Pérdidas del acero $\Delta P_{ac} \approx 20-25\% \Sigma P_{erd}$

Resistencia del estator.

$$R_1 = (P_{1n} - \Delta P_{ac} - \Delta P_{cob} - \Delta P_{ad} - \Delta P_{mec} - P_{2n}) / 3 I_{1n}^2$$

Cálculos de los Parámetros Bases:

Corriente base: $I_b = \sqrt{2} I_n$
 Voltaje base: $U_b = \sqrt{2} U_n$
 Impedancia base: $Z_b = U_b / I_b$
 Frecuencia base angular: $w_b = 2\pi f_n$
 Concatenaciones de flujo base: $\psi_b = U_b / w_b$
 Momento base: $M_b = (3/2 U_b I_b) / (w_b / p/2)$
 $M_{base} = P_{base} / W_{sn}$
 $P_{base} = 3 U_n I_n = (3 U_b / \sqrt{2}) (I_b / \sqrt{2})$
 $P_{base} = 3/2 U_b I_b$
 $W_{sb} = w_b / (p/2)$

Cálculo de la resistencia del rotor y del estator por unidad:

$R_{rp.u.} = S_n = (n_s - n_n) / n_s$ $R_{sp.u.} = R_s / Z_b$
 Reactancias de dispersión.
 $X_{sp.u.} = w_b L_s / Z_b$
 $I_{arr} = (U_n / \sqrt{3}) / \sqrt{((R_r + R_s)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2)}$
 $X_{sl} + X_{rl} = \sqrt{((U_n / \sqrt{3} / I_{arr}) - (R_r + R_s))^2}$
 $X_{sl} = X_{rl} = (X_{sl} + X_{rl}) / 2$
 $X_{sl p.u.} = X_{sl} / Z_n$

Cálculo de X_m Reactancias de magnetización:

En condiciones nominales y $\cos \varphi \approx 1$
 $R_r / s \gg X_{rl}$
 $I_{2n} = I_{1n} \cos \varphi$
 $I_m = \sqrt{(I_{1n}^2 - I_{2n}^2)}$
 $E_{1n} = U_{1n} - (I_{2n} R_s + I_m X_{sl}) + j(I_m R_s - I_{2n} X_{sl})$
 $X_m = E_{1n} / I_m$
 $X_{m.p.u.} = X_m / Z_b$
 $X_{m p.u.} = w_b L_m / Z_b$

Cálculo de S_{pu} :

$X_{s p.u.} = X_{sl p.u.} + X_{m p.u.}$
 $X' p.u. = X_{s p.u.} - (X_m)^2 / X_r$
 $S_{p.u.} = R_r / X'$

Cálculo de M max:

$$K_{p.u.} = K_r = K_s = X_m / X_r = X_m / X_s$$

$$M_{max \text{ p.u.}} = K^2 / 2X'$$

$$T's = L' / R_s \quad wbT's = wbL' / R_s \quad \tau's = X' / R_s$$

$$T'r = L' / R_r \quad \tau'r = X' / R_r$$

Datos de chapa del motor son:

$$\text{Voltaje nominal de fase: } U_n = 380 \text{ (V)}$$

$$\text{Corriente nominal: } I_n = 46 \text{ (A)}$$

$$\text{Potencia nominal: } P_n = 22 \text{ (Kw)}$$

$$\text{Factor de potencia nominal: } \cos \phi = 0.82$$

$$\text{Frecuencia nominal: } f_n = 50 \text{ (Hz)}$$

$$\text{Velocidad nominal: } N_n = 980 \text{ (rpm)}$$

$$\text{Multiplicidad de Corriente: } I_{arr} / I_{nom} = 7.2$$

$$\text{Momento: } M_{nom} = 22 \text{ Kgfm}$$

$$\text{Multiplicidad del par: } M_{arr} / M_{nom} = 2.1$$

$$\text{Momento de inercia: } J_{nom} = 0.3554 \text{ Kg}m^2$$

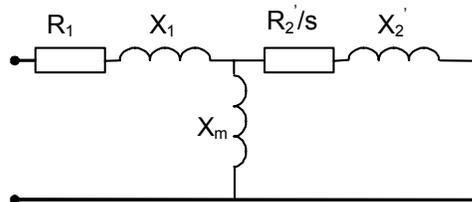


Fig. Fig. 1: Circuito equivalente en T

Los valores del circuito equivalente T son:

$$R_1 = 0.2287 \Omega \quad R_2 = 0.0954 \Omega$$

$$X_{s1} = 0.2889 \Omega \quad X_{r1} = 0.2889 \Omega$$

$$X_m = 7.7163 \Omega$$

Los valores bases obtenidos son:

$$I_b = 65.0538 \text{ (A)} \quad Z_b = 4.7694 \Omega$$

$$V_b = 310.2687 \text{ (V)} \quad P_b = 30.2762 \text{ (Kw)}$$

$$M_b = 289.116 \text{ (Kg}m^2) \quad W_{1b} = 314.159 \text{ (rad/seg)}$$

Los valores obtenidos llevados a por unidad son:

$$R_1 \text{ p.u.} = 0.0479 \quad R_2 \text{ p.u.} = 0.02$$

$$X_{s1} \text{ p.u.} = 0.606 \quad X_{r1} \text{ p.u.} = 0.606$$

$$X_m \text{ p.u.} = 1.6179$$

Con estos parámetros calculados y las ecuaciones que describen el proceso transitorio de la máquina asincrónica, descritas anteriormente, podemos realizar la simulación del motor asincrónico de CA, de la cual obtenemos graficando el voltaje de la fase A, el resultado siguiente:

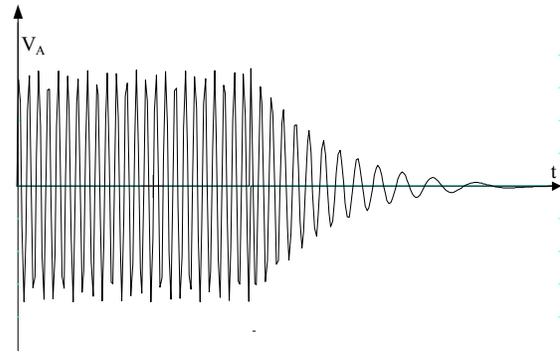


Fig. 2: Voltaje de la fase A en la desconexión del motor asincrónico

5. CONCLUSIONES

Una vez llevado a cabo este análisis y realizado el programa de simulación que emula el comportamiento transitorio del motor asincrónico en el proceso de desconexión de la red de alimentación a partir de los modelos matemáticos eso es de importancia para saber cuando termina dicho proceso para realizar una nueva conexión o para saber en que momento se debe reconectar la máquina logrando el mínimo de corriente sin dañar tanto la máquina como la carga en su eje.

REFERENCIAS

- Costa M., A. *Procesos Transitorios en Máquinas Asincrónicas*. Curso de Máquinas Eléctricas. Universidad de Camagüey, 1996.
- 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.
- Ivanov-Smolenski, A.V. *Máquinas Eléctricas*. Moscú, Editorial Mir, 1980.
- Kopilov, L. *Ecuaciones de las Máquinas asincrónicas en diferentes sistemas de coordenadas*. URSS: Ed. Buzof, Electromecánica, No 3, 1986. (en Ruso).
- Kovacs, P. K. *Transient phenonema in electrical machines*. Budabest, Ed. Akademi Kradó, 1986.
- Pardo, A; Díaz, J. L. *Fundamentos en Sistemas de Control Automático*. Universidad de Pamplona. 2004.