

ANÁLISIS DEL PROCESO DE PARTIDA Y SINCRONIZACIÓN DE MOTORES SINCRÓNICOS

M. Aníbal Valenzuela L.
Depto. Ingeniería Eléctrica
Universidad de Concepción
Concepción-Chile

Roberto Falck C.
Depto. Ingeniería Eléctrica
Universidad de Concepción
Concepción-Chile

Francisco Salamanca P.
Supcia. Concentrador
Codeico-Chuquicamata
Chuquicamata - Chile

RESUMEN

Se analizan las características y variables más importantes del proceso de partida y sincronización de los motores sincrónicos. Por medio de una simulación digital de todo el proceso de arranque se obtienen los valores instantáneos de corrientes, velocidad, flujo magnético y torque.

Utilizando este modelo se analizan el efecto del deslizamiento existente, de la fase del flujo magnético, del nivel de excitación aplicada al campo y del torque resistente de la carga. En cada caso se reportan las curvas de interés para un motor de parámetros típicos.

Se concluye que para obtener una sincronización exitosa, el relé encargado de la aplicación del campo debe verificar que se ha alcanzado una velocidad mínima y producir la conexión de la excitación en el instante óptimo, que corresponde al cruce por cero de la corriente inducida desde valores negativos a valores positivos.

ABSTRACT

The most important variables and characteristics of the starting and synchronization of the synchronous motors are analyzed. Using a digital simulation of the starting, the instantaneous values of currents, velocity, magnetic flux and torque are obtained.

This model is used to evaluate the effect during the synchronization of the existing velocity slips, the relative phase of the magnetic flux, the applied voltage to the field and the resistant torque. In all cases, the curves of the most important variables are reported and analyzed for a typical motor.

The conclusion is that to obtain a exitous synchronization, the starting control relay must

verify that the motor has reach a minimum velocity and connect the excitation at instant that the induced current is zero, going from negative values to positive values.

1.- INTRODUCCION

El método más frecuentemente utilizado para el arranque de los grandes motores sincrónicos industriales, es a través de un enrollado del tipo inducido. Este sirve además para propósitos de amortiguar las oscilaciones mecánicas en situaciones transientes. Un motor que carezca del enrollado de partida tipo jaula, tendría un torque de partida muy bajo. Este enrollado produce un torque función del deslizamiento en forma similar a como ocurre en los motores de inducción.

A diferencia de los motores de inducción tipo jaula de ardilla, las barras del enrollado de partida/amortiguador suelen ser diferentes en forma, tamaño, incluso material y no siempre están uniformemente espaciadas, aún cuando mantienen simetría respecto del eje central de los polos. Por ello, su contribución al torque de arranque es diferente. Además, como tienen normalmente una estructura rotórica de polos salientes, se producen torques de tipo pulsante y, a bajo deslizamiento, del tipo reluctancia.

Una vez alcanzada una velocidad cercana a la sincrónica, el motor es sincronizado mediante la aplicación de corriente continua al enrollado de campo. Para que la sincronización sea plenamente exitosa se debe lograr acelerar el sistema hasta la velocidad sincrónica dentro de los primeros 180° de torque de aceleración positivo que se tendrán una vez aplicada la excitación. Si esto no es así, existirán pulsaciones cíclicas que provocan efectos negativos en la carga conectada y en el sistema eléctrico de alimentación.

En muchas de las aplicaciones industriales en que se utilizan motores sincrónicos, el proceso de sincronización es bastante exigido debido principalmente a las altas inercias involucradas. Tal es la situación, por ejemplo, de accionamientos de molinos de barras y bolas usados en la gran minería del cobre. La evaluación exhaustiva de estas situaciones requiere disponer de un modelo que considere todos los efectos señalados, entregando los valores instantáneos de corrientes, flujos magnéticos, torques y deslizamientos. Al respecto, en [1] el autor presenta un modelo para evaluar la incidencia de los parámetros de diseño en la característica de torque medio desarrollado durante la operación asincrónica. Se obtienen asimismo, los valores efectivos de las corrientes que circulan por las barras rotóricas.

En el presente trabajo se extiende el modelo del motor sincrónico para entregar las variables instantáneas durante la operación asincrónica y en la etapa de sincronización. Este modelo se aplica a un motor típico lo que permite cuantificar el efecto sobre la sincronización de cada una de las variables involucradas.

2.- CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE PARTIDA

A diferencia de las condiciones de arranque de un motor de inducción, en este caso se debe considerar adicionalmente la configuración geométrica del rotor, la disposición de las barras que forman la jaula de ardilla y la existencia del enrollado de campo.

La diferencia de reluctancia en los ejes directo y de cuadratura del rotor, la distribución no uniforme de las barras y su geometría y/o materiales diferentes originan, durante todo el proceso de arranque, oscilaciones en el torque eléctrico, corriente de armadura y factor de potencia respecto de sus valores medios (efectivos).

En cuanto al enrollado de excitación, éste, debido a su alto número de vueltas, no puede dejarse abierto durante la partida, pues las altas corrientes inducidas perforarían su aislación. Por ello, el esquema de partida de un motor sincrónico incluye cerrar el circuito de excitación a través de una resistencia de descarga, que se calcula para limitar las tensiones entre espiras a valores seguros para la aislación. En estas condiciones, durante el arranque, circularán por el enrollado de excitación corrientes inducidas de la frecuencia de deslizamiento, que al interactuar con el campo magnético rotatorio (C.M.R.)

del estator, originarán un torque. Unido a esto, la estructura de polos salientes del rotor origina un componente de torque del tipo de reluctancia, que se manifestará principalmente en la zona de bajos deslizamientos.

Un mayor valor de la resistencia de descarga provocará un aumento del torque medio desarrollado. No obstante, las tensiones inducidas en el enrollado de campo también aumentarían, comprometiendo su aislación y a otros componentes del circuito de campo. Por lo tanto, la correcta selección del valor de la resistencia de descarga del campo requiere considerar los efectos que se obtienen sobre el torque, el sistema de excitación y los componentes del control.

Lo anterior es de suma importancia pues el éxito en la etapa de sincronización está fuertemente influido por el deslizamiento con que queda el conjunto motor-carga en la etapa de partida.

3.- CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE SINCRONIZACION

En la etapa de sincronización se remueve la resistencia de descarga del enrollado de excitación y se aplica corriente continua. La puesta en sincronismo requiere que se suministre un torque suficiente, inmediatamente después de la remoción de la resistencia de descarga, de modo de acelerar las inercias del conjunto motor-carga hasta la velocidad sincrónica dentro de los 180° de torque de aceleración positivo.

La velocidad de aplicación determina, en cada situación específica, la cantidad de energía que se requerirá suministrar para lograr la sincronización. Influye además, la inercia total del sistema. Valores típicos fluctúan en torno al 95% de la velocidad sincrónica.

En relación al instante óptimo, resulta útil para su comprensión asumir que el C.M.R. del estator es producido por una corriente ficticia I_1 . En estas condiciones la relación de fase entre esta corriente, el flujo magnético y la corriente inducida en el rotor es la mostrada en la Fig.1.

En ella se aprecia que el punto de máximo flujo inducido ocurre para el instante en que la corriente I_2 inducida en el campo pasa por cero desde valores negativos a valores positivos. Este instante corresponde a la mejor situación para remover el campo y aplicar la excitación ya que, por un lado, queda atrapado el flujo inducido y, por otro, este flujo es in-

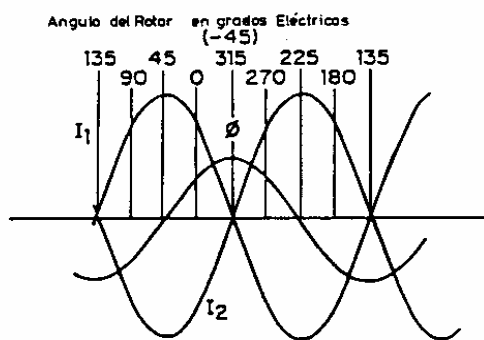


Fig.1.- Relación de Fase entre la Corriente equivalente de Estator, el Flujo Magnético y la Corriente Inducida en el Rotor para un deslizamiento dado.

crementado por efecto de la corriente de excitación impuesta.

La posición relativa del rotor en el instante en que la corriente inducida en el campo pasa por cero, depende de la relación reactancia/resistencia del circuito de excitación, incluida la resistencia de descarga. Para bajos deslizamientos este valor puede fluctuar entre 30° a 45° eléctricos de retraso respecto del C.M.R. del estator.

Una vez aplicada la excitación, el proceso de aceleración a la velocidad sincrónica estará determinado por el torque de aceleración y por las inercias del sistema.

4.- MODELO DEL MOTOR SINCRÓNICO DURANTE LA PARTIDA Y SINCRONIZACIÓN.

El hecho que el motor tenga una estructura de polos salientes y que las barras del enrollado de partida no sean idénticas entre sí, imposibilita obtener un modelo satisfactorio del comportamiento de la jaula por medio de un único enrollado equivalente. Se deben definir grupos de bobinas orientadas en los ejes directo y cuadratura, con acoplamientos inductivos en cada eje y trayectorias comunes en los anillos de cortocircuito.

El modelo obtenido fue presentado en [1] y, a modo de ejemplo, se muestra en la Fig.2 el circuito equivalente correspondiente al eje directo, cuando en el rotor se han definido dos bobinas de distinto paso polar. El voltaje aplicado sobre el eje directo está equilibrado por la caída en la resistencia r y por la tensión inducida por el flujo que enlaza esta bobina. Este flujo tiene dos componentes: el flujo

de dispersión X_1 y el flujo que atraviesa el entrehierro. La reactancia X_{ad} que representa el flujo en el entrehierro, se muestra dividida para evidenciar qué porción del total de este flujo es mutuo con los distintos circuitos rotóricos de un mismo eje.

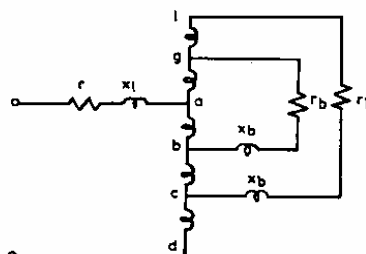


Fig.2.- Circuito Equivalente de Eje Directo,

El circuito equivalente que representa el eje cuadratura se establece en forma análoga.

En base a estos circuitos es posible plantear las ecuaciones del modelo de un motor sincrónico de polos salientes en régimen asincrónico. La enumeración de los circuitos de barra para el eje directo se efectúa partiendo desde el eje central del polo hacia los extremos de la pieza polar. Para los circuitos de barras en eje cuadratura, la enumeración se realiza en forma inversa.

Considerando operación balanceada, los sistemas de ecuaciones que representan a un motor sincrónico con "n" circuitos en el eje directo y "m" circuitos en el eje de cuadratura durante los periodos de partida y de sincronización son:

- SISTEMA DE ECUACIONES DURANTE LA PARTIDA.

Ecuaciones de voltaje:

$$v_d = r i_d + p \lambda_d - p \theta \lambda_q \quad (1)$$

$$v_q = r i_q + p \lambda_q + p \theta \lambda_d \quad (2)$$

$$0 = (r_{fd} + r_{des}) i_{fd} + p \lambda_{fd} \quad (3)$$

$$0 = \sum_{k=1}^n r_{k1d} i_{1d} + p \lambda_{kd} \quad ; k = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$0 = \sum_{k=1}^m r_{k1q} i_{1q} + p \lambda_{kq} \quad ; k = 1, \dots, m \quad (5)$$

Ecuaciones de Flujo Enlazado :

Eje directo :

$$\lambda_d = X_d i_d + X_{afd} i_{fd} + \sum_{l=1}^n X_{ald} i_{ld} \quad (6)$$

$$\lambda_{fd} = X_{afd} i_d + X_{ffd} i_{fd} + \sum_{l=1}^n X_{fld} i_{ld} \quad (7)$$

$$\lambda_{jd} = X_{ajd} i_d + X_{fjd} i_{fd} + \sum_{l=1}^n X_{jld} i_{ld}; j=1, \dots, n \quad (8)$$

Eje Cuadratura :

$$\lambda_q = X_q i_q + \sum_{l=1}^m X_{alq} i_{lq} \quad (9)$$

$$\lambda_{jq} = X_{ajq} i_q + \sum_{l=1}^m X_{jlq} i_{lq}; j=1, \dots, m \quad (10)$$

Ecuaciones de Movimiento :

$$2 w_o H \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_m - T_r \quad (11)$$

$$T_m = \lambda_d i_q - \lambda_q i_d \quad (12)$$

$$p\theta = 1 - p\delta \quad (13)$$

Condiciones iniciales :

$$p\theta = 0 \quad (14)$$

$$i_d, i_q, i_{fd}, i_{ld}, i_{lq} = 0 \quad (15)$$

- SISTEMA DE ECUACIONES DURANTE LA SINCRONIZACION.

En general son válidas las mismas ecuaciones con las siguientes modificaciones :

Ecuación de voltaje de campo :

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + p \lambda_{fd} \quad (16)$$

Condiciones iniciales :

$$p\theta > 0.95 \quad (17)$$

$$\lambda_{fd} = \text{MAX} \iff \begin{cases} i_{fd} = 0 \\ p i_{fd} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

Conocidos los parámetros en (p.u.) de resistencias, reactancias, inercia del sistema, voltajes de armadura y campo e imponiendo las condiciones iniciales que correspondan, la resolución numérica de estas

ecuaciones permite determinar el valor instantáneo de cualquier variable de interés durante todo el proceso de partida y sincronización.

5.- ANALISIS DE LA PARTIDA Y SINCRONIZACION

El modelo del motor síncronico se implementó en un programa que permite simular el proceso de partida y sincronización y analizar los efectos de cada una de las variables que tienen incidencia.

Como motor de prueba se utilizó el reportado en [2] y se procedió a evaluar las siguientes situaciones de interés :

- Operación durante la partida
- Efecto del deslizamiento existente al momento de conectar la excitación.
- Efecto del Angulo de Torque.
- Efecto del voltaje de excitación aplicado.
- Efecto del torque resistente.

Los gráficos y comentarios de las principales situaciones analizadas son :

- OPERACION DEL MOTOR SINCRONICO DURANTE LA PARTIDA

La Fig.3 muestra el torque producido por el motor desde el instante de la partida hasta alcanzar el régimen permanente. El torque resistente se asumió proporcional a la velocidad, permaneciendo constante para velocidades mayores a un 90% del valor nominal. La curva de velocidad respectiva se muestra en la Fig.4.

Se aprecia que la curva de torque en su inicio, presenta fuertes oscilaciones, incluso con valores negativos, originadas principalmente por la componente transitoria de la corriente de magnetización que se produce al conectar en forma simultánea las tres fases del motor. Posteriormente, a diferencia de lo que ocurre en un motor de inducción, las oscilaciones continúan durante todo el periodo de partida y siempre están presentes aún cuando el motor haya alcanzado su estado de régimen. Estas oscilaciones se caracterizan por ser menores que al inicio del proceso y muy simétricas, siendo su valor medio igual al torque resistente.

La presencia permanente de un torque oscilante, mientras el motor opera sin la excitación conectada, se debe a la configuración geométrica que posee el rotor. Por ser éste de polos salientes, se tiene una diferencia en el valor de reluctancia en los ejes d

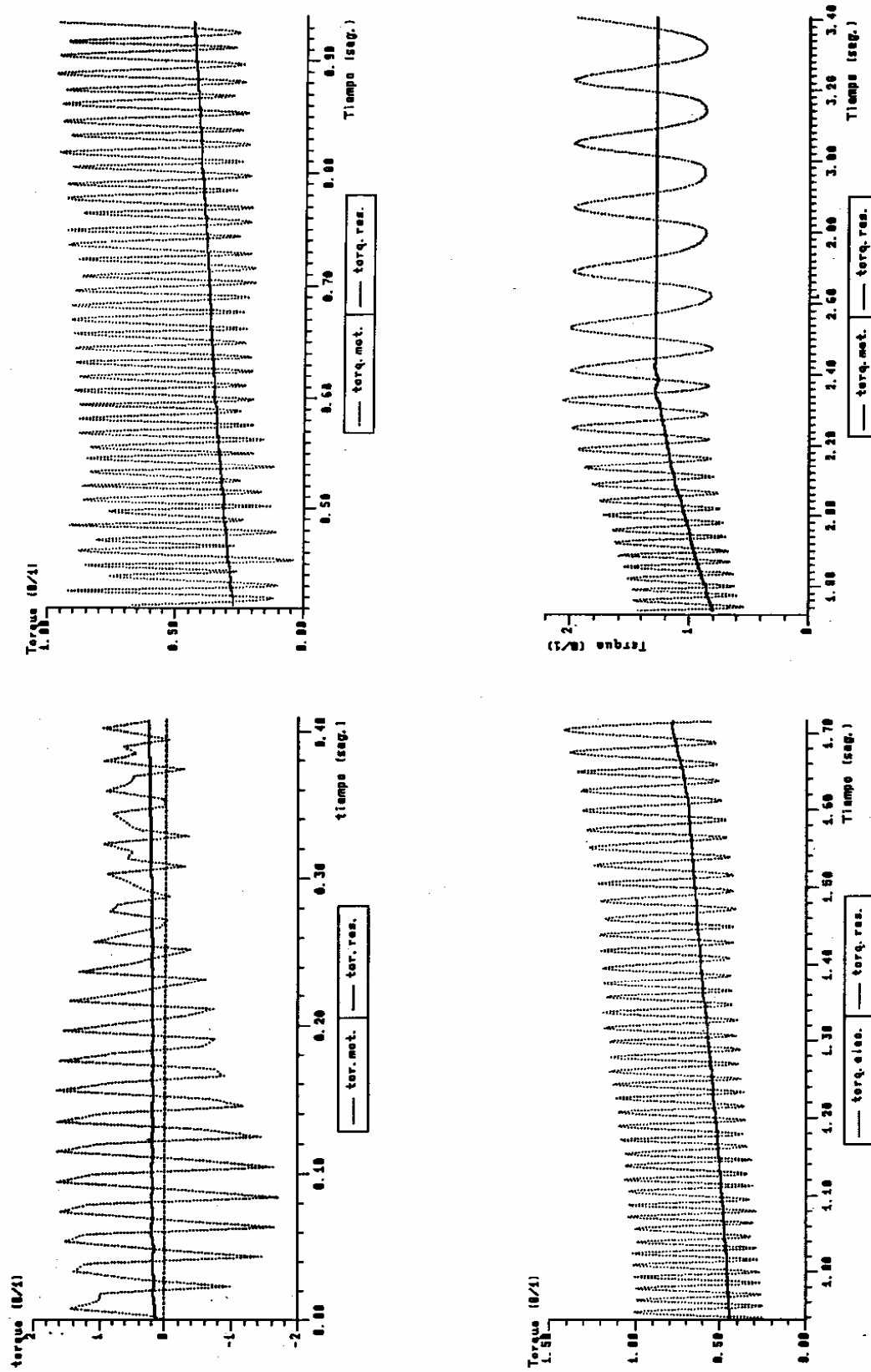
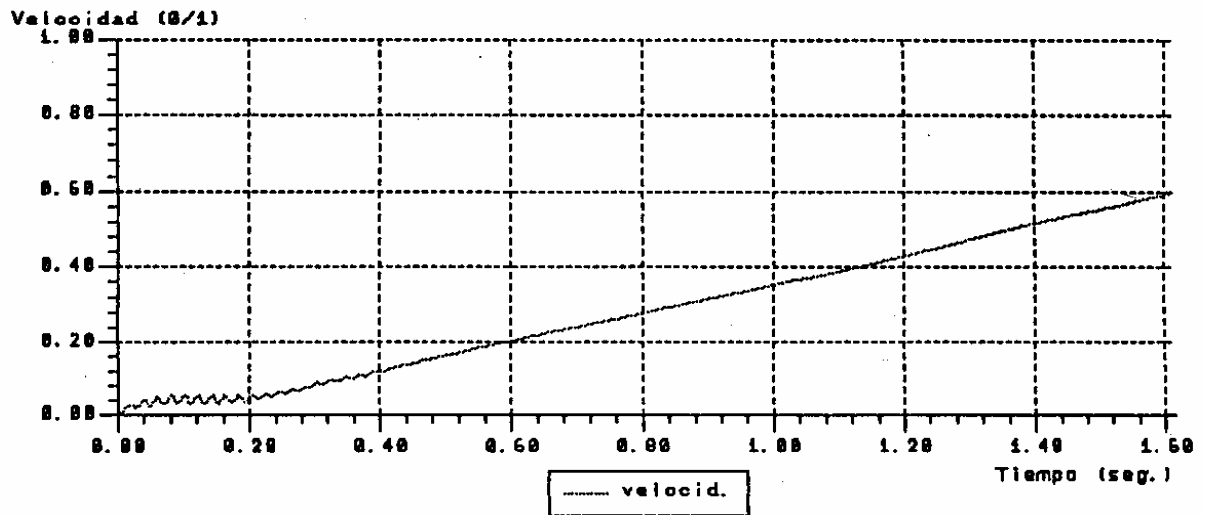
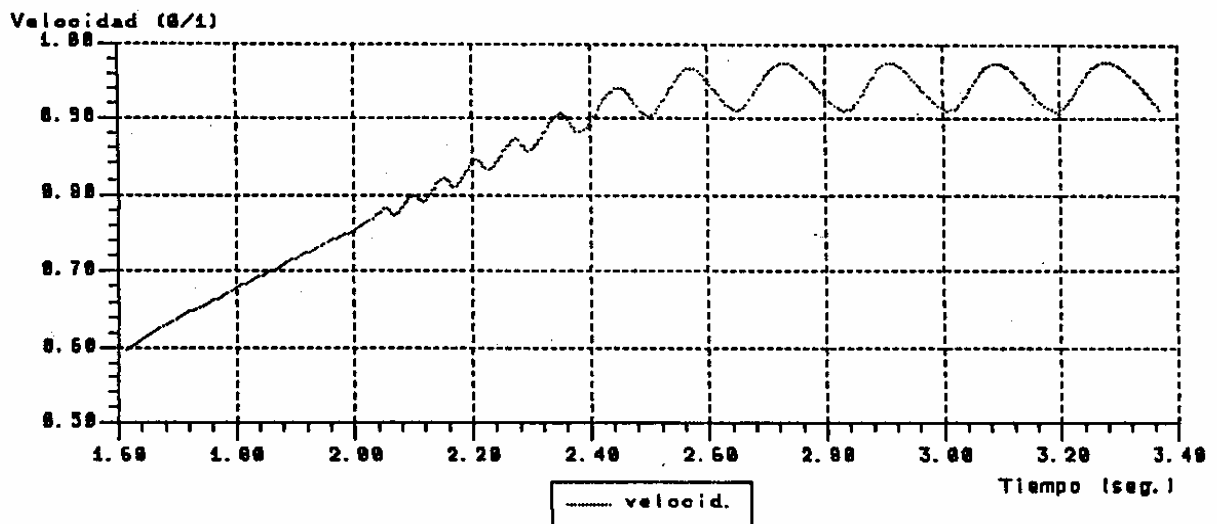


Fig. 3 : Curvas de Torque Motor y Torque Resistente durante la Partida.



a.- Tiempo : 0 - 1.6 Seg.



b.- Tiempo : 1.6 - 3.4 Seg.

Fig.4.- Curva de Velocidad durante la partida.

y q del rotor, lo que produce la variación en el valor de torque en todo instante.

Respecto de la curva de velocidad obtenida, se destacan las pequeñas variaciones en el instante de la partida, como consecuencia de las oscilaciones del torque motor, luego crece en forma prácticamente lineal, para quedar finalmente oscilando alrededor de un valor medio por causa de las oscilaciones del torque motor.

- EFECTO DEL DESLIZAMIENTO DE SINCRONIZACION

La Fig.5 muestra las curvas de torque y velocidad para el caso de conexión de la alimentación continua cuando el motor haya logrado una velocidad igual a un 98% de la velocidad nominal. La Figura 6 muestra las mismas variables, pero en el caso que la excitación se conecta en el instante que la velocidad es de un 65% de la velocidad nominal.

Las curvas para velocidades menores a un 50% del valor nominal no se presentan en este caso ni en los siguientes, por no ser trascendentes en el proceso de sincronización. El instante de aplicación de la alimentación continua al campo del motor, es indicado en los gráficos de torque por una línea segmentada y en los de velocidad, mediante una línea continua.

Las curvas indican la ventaja de sincronizar con una velocidad lo más cercana a la nominal, lográndose la sincronización rápidamente, en un tiempo de 0.42 seg. aproximadamente para el caso simulado y las oscilaciones de torque motor y velocidad son mínimas, amortiguándose prontamente. De esta forma, las variaciones de la corriente de armadura también son reducidas y no producen alteraciones en el nivel de voltaje de la red de alimentación del motor. En esta situación, las posibilidades de una sincronización exitosa aumentan debido a la menor aceleración requerida para lograr la velocidad nominal, lo que asume gran importancia cuando el torque resistente y/o la inercia del sistema sean relevantes.

Cuando el proceso de sincronización se inicia en forma anticipada, como lo muestra la Fig.6, el motor continúa acelerando con el mismo nivel de oscilaciones de torque que tenía anteriormente, intentando alcanzar la velocidad sincrónica. Pero luego, las oscilaciones de torque aumentan, produciendo a su vez, pulsaciones en la velocidad con valores extremos de 0.9 (0/1) y 1.01 (0/1). Esto implica una zona en que el motor opera con la velocidad nominal, pero no es capaz de mantenerse en tal situación inde-

finidamente, originando nuevamente fuertes pulsaciones de torque y formándose así ciclos repetitivos de oscilación de estas variables. Esto evidencia que alcanzar la velocidad sincrónica es una condición necesaria pero no suficiente para obtener una sincronización exitosa. El aumento de las pulsaciones de torque es causado por la aplicación de la alimentación continua, las que no se aprecian en el período inmediatamente posterior a la conexión, debido a la alta constante de tiempo que se tiene en el circuito de campo al desconectar la resistencia de descarga.

- EFECTO DEL ANGULO DE TORQUE EN LA SINCRONIZACION

Se analizaron diversas situaciones de conexión de la alimentación continua al campo para distintos ángulos de torque, manteniendo constantes las demás variables. En todos los casos se impuso que, previo a poder conectar la excitación, el motor debía alcanzar una velocidad de un 98% de la velocidad nominal.

La Fig.7 muestra las curvas de torque y velocidad con el motor funcionando como motor de inducción y abarcan el período de tiempo durante el cual normalmente se conecta la alimentación continua al campo. En la Fig.8, la curva de corriente inducida en el enrollado de campo se grafica con respecto al tiempo y al ángulo de torque. La desigualdad en los semiciclos positivos y negativos del torque se debe al tipo de torque resistente considerado.

Los casos simulados de aplicación de la alimentación continua para diferentes ángulos de torque, son los siguientes :

a) Conexión de la excitación con un ángulo de torque de 35°. Los gráficos de torque, velocidad y flujo en el enrollado de campo se muestran en la Fig. 9. El momento de aplicación de la alimentación continua es para un tiempo de 1.735 seg., correspondiendo según Fig.8, una corriente inducida en el enrollado de campo de valor nulo y aumentando en sentido positivo. Por lo tanto se tiene la condición de máximo flujo en el enrollado de campo con un valor de 0.72 (0/1); de acuerdo a Fig.8, corresponde un ángulo de torque de 35°. Esto demuestra el atraso que se produce para la condición de flujo total máximo en el enrollado de campo, debido al carácter inductivo que posee. Esta situación presenta la condición óptima para conectar la excitación, atrapando el máximo de flujo al desconectar la resistencia de descarga y teniendo un ángulo de torque pequeño. Tal situación implica que la conexión de la excitación, coincide con el instante

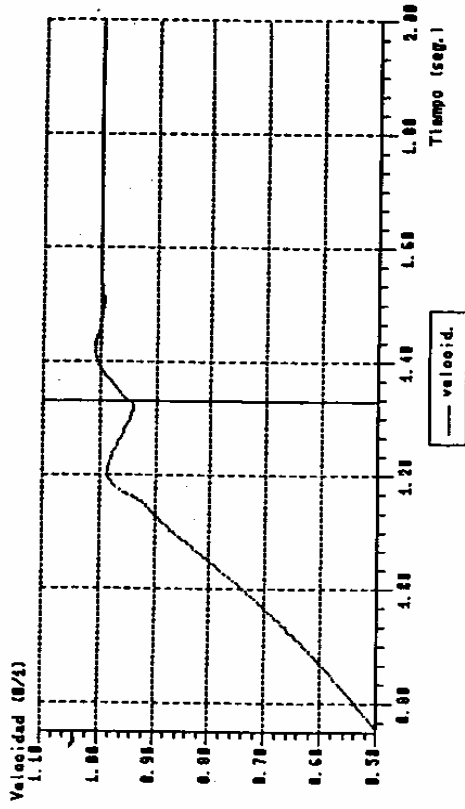
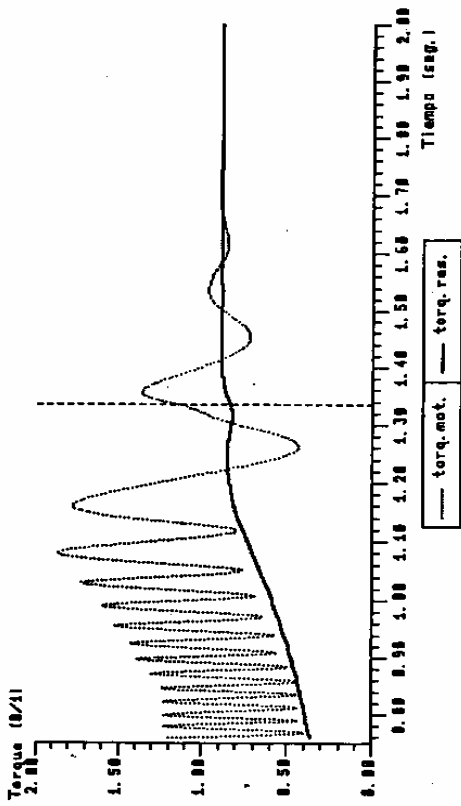


Fig. 5 : Curvas de Torque y Velocidad con la Excitación conectada para un 98% de la Velocidad Nominal.

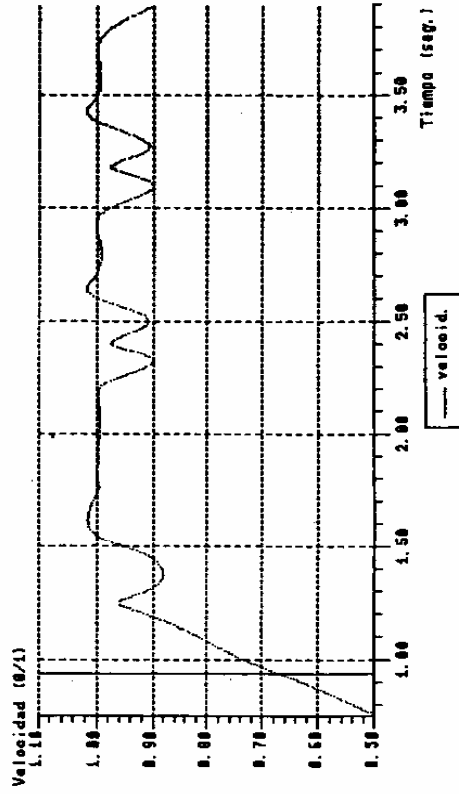
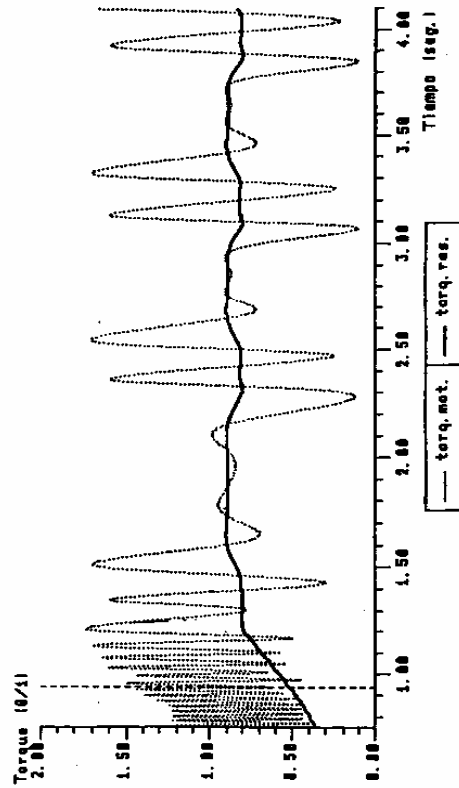


Fig. 6 : Curvas de Torque y Velocidad con la Excitación conectada para un 65% de la Velocidad Nominal.

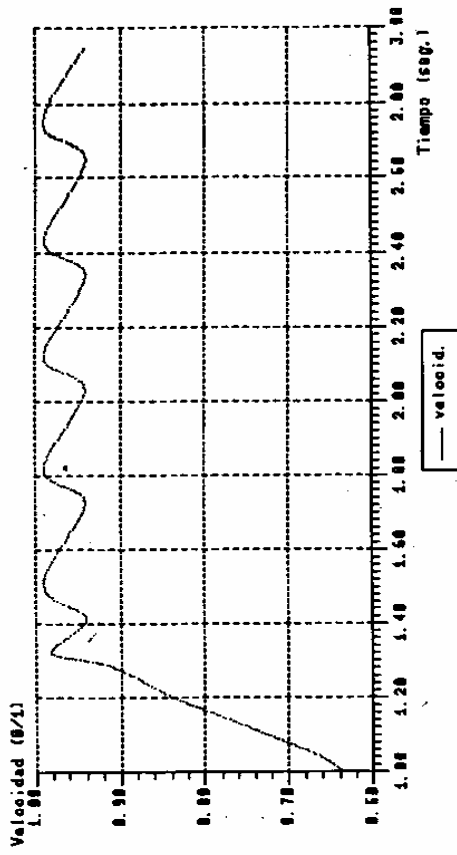
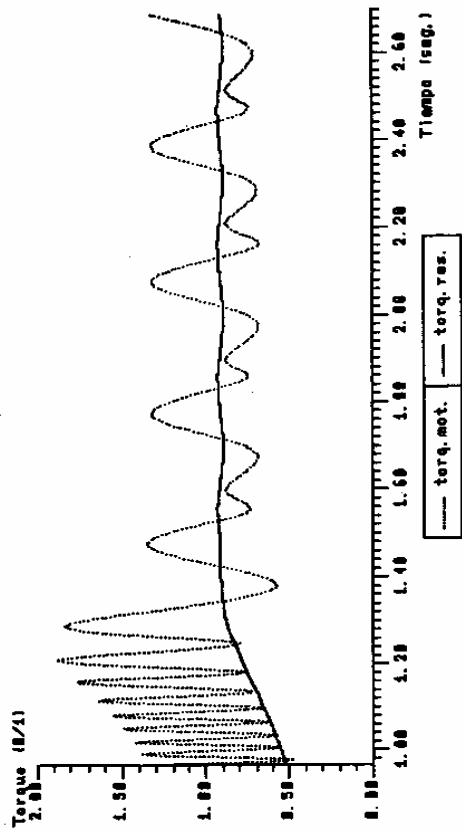


Fig. 7 : Curvas de Torque y Velocidad sin Conexión de la Alimentación Continua
a) Enrollado de Campo.

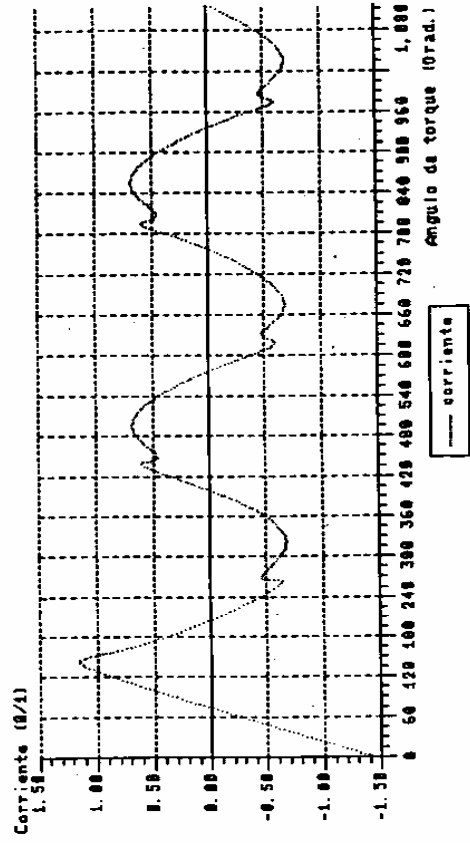
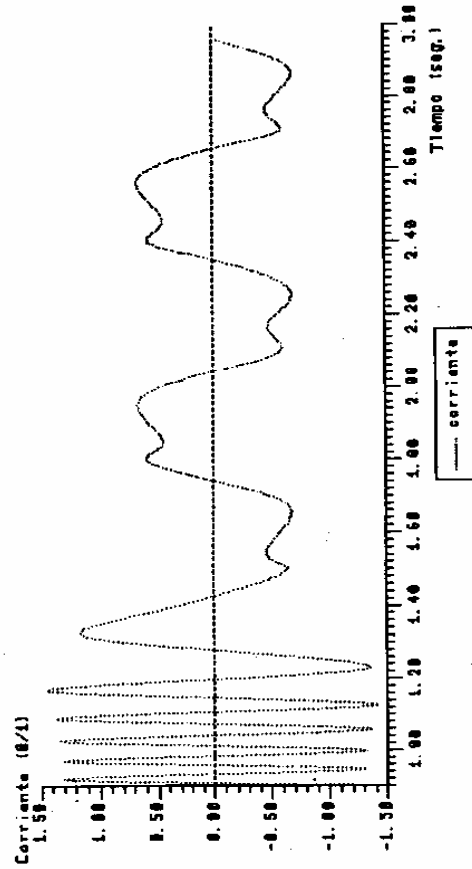


Fig. 8 : Corriente Inducida en el Enrollado de Campo en Función del Tiempo y del Angulo de Torque.

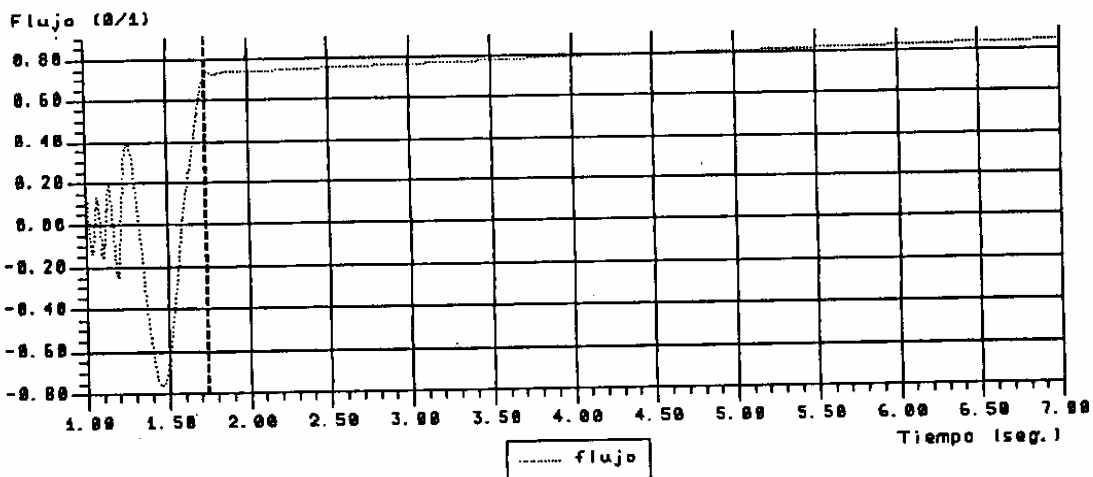
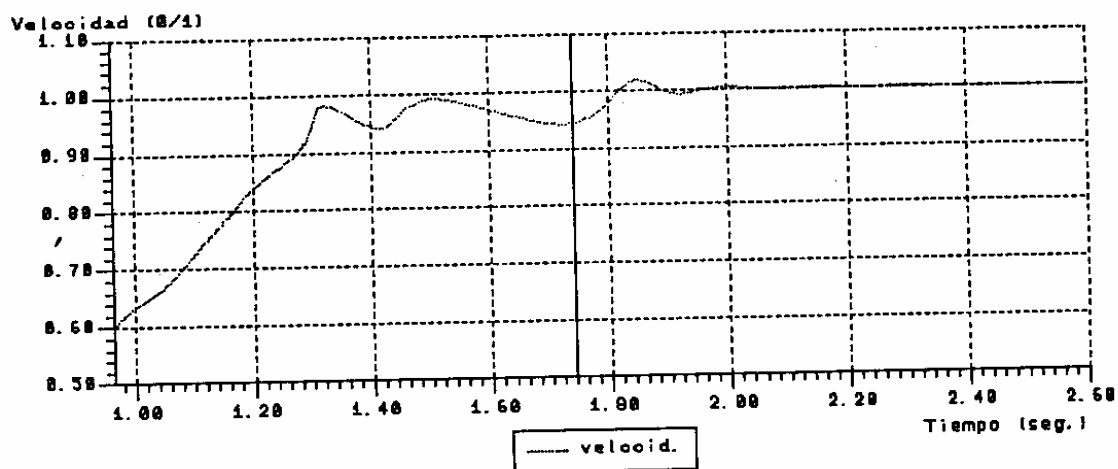
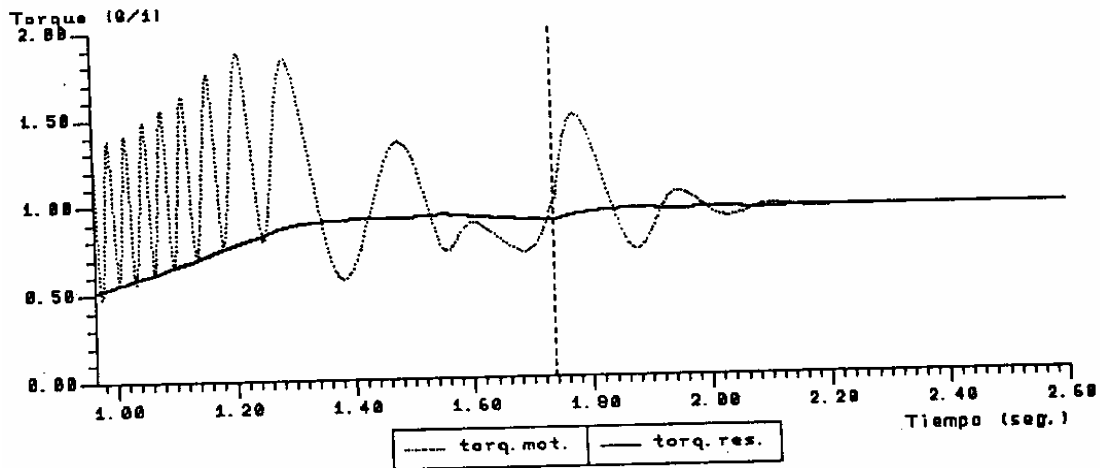


Fig. 9 : Curvas de Torques, Velocidad y Flujo Magnético en el Enrollado de Campo al Aplicar la Excitación para un Angulo de Torque de 35°.

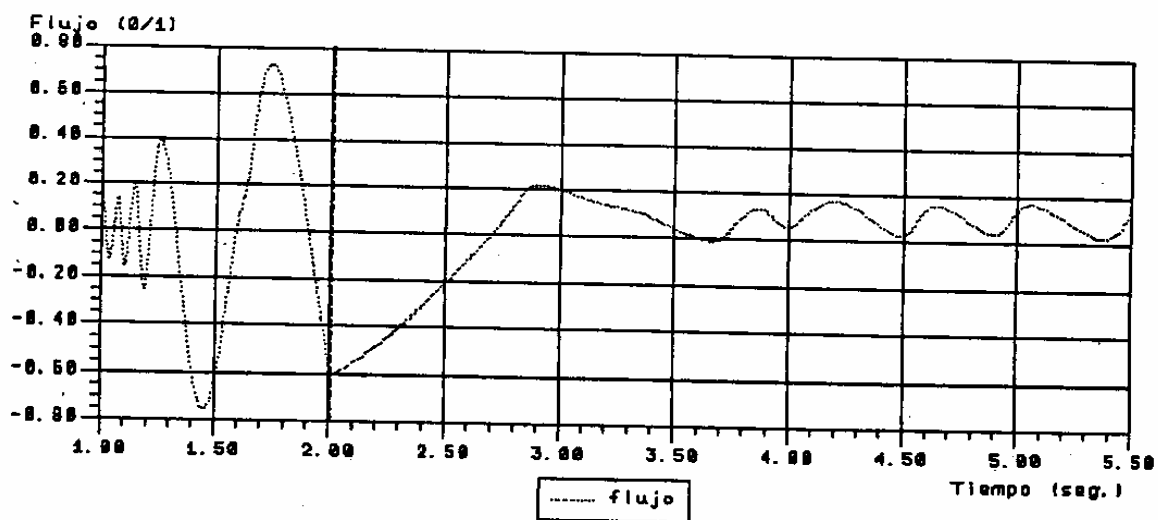
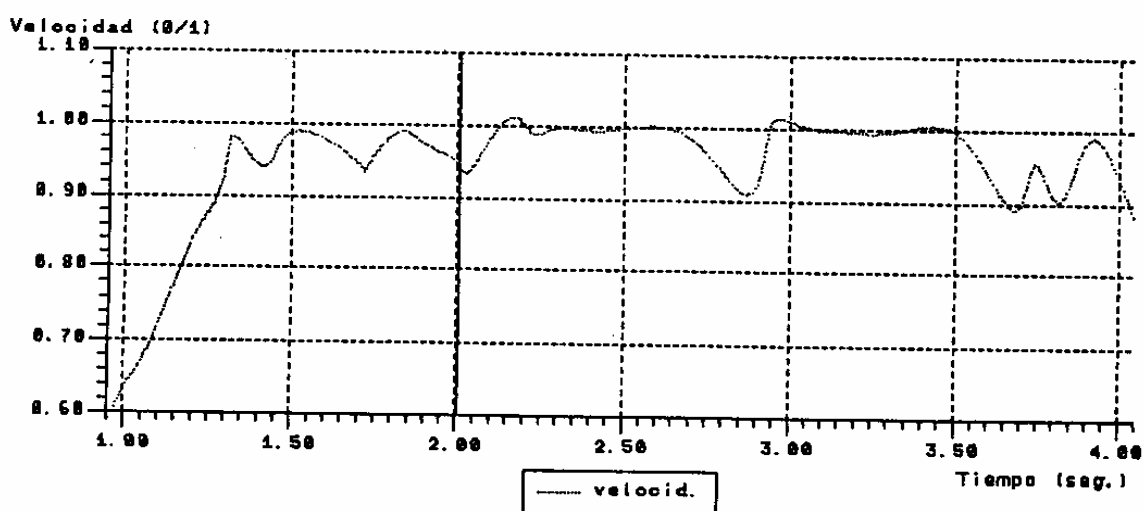
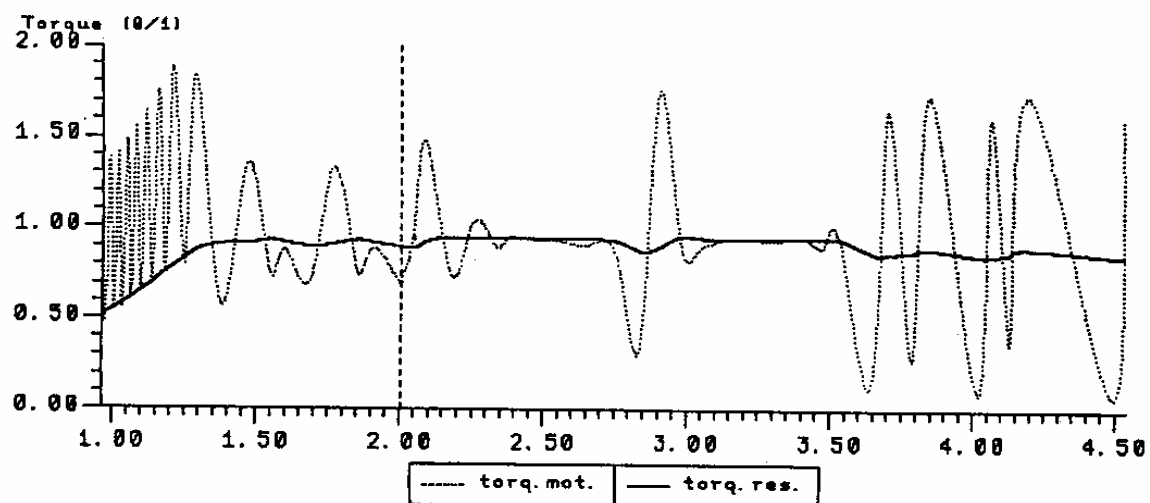


Fig.10 : Curvas de Torque, Velocidad y Flujo Magnético en el Enrollado de Campo al Aplicar la Tensión para un Angulo de Torque de 180°.

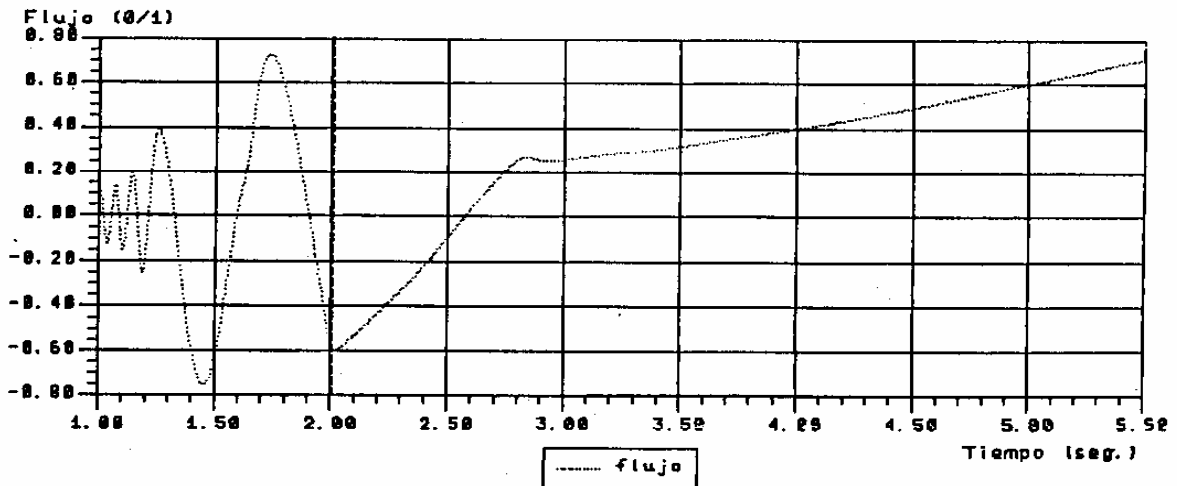
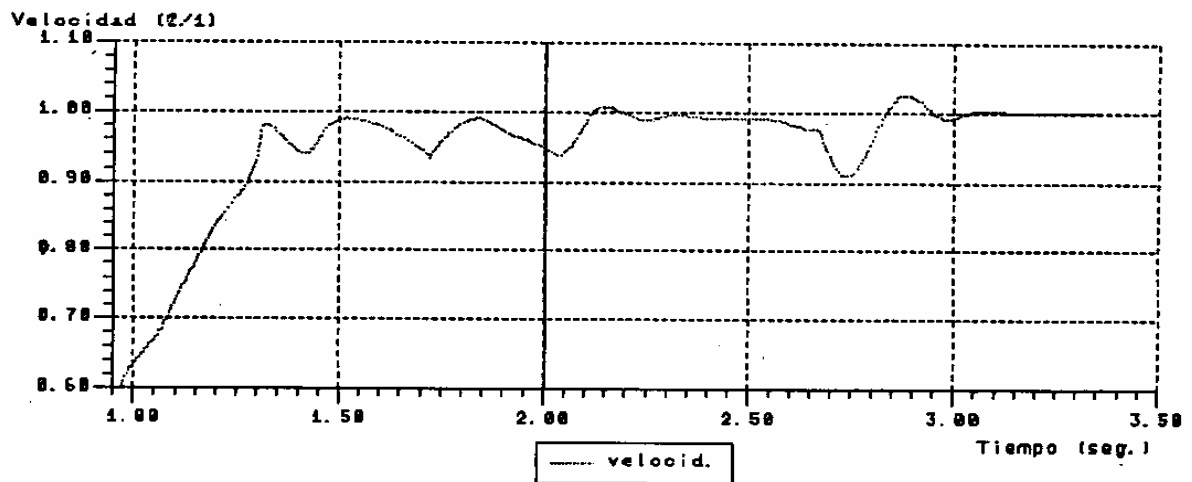
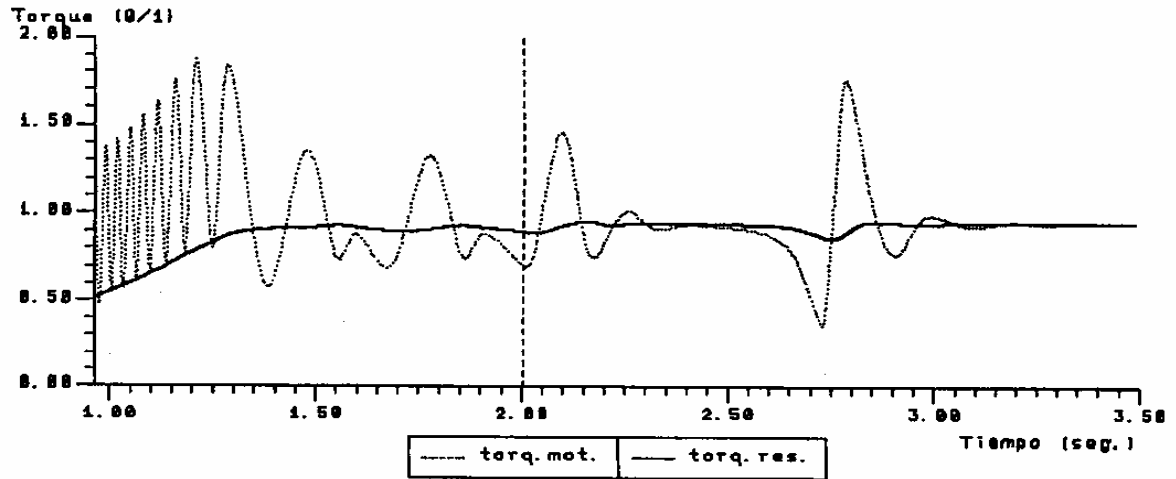


Fig.11 : Curvas de Torques, Velocidad y Flujo Magnético en el Enrollado de Campo para un Aumento de un 45% sobre el Valor de Excitación Original y Conectada para un Angulo de Torque de 180°.

en que la curva de torque motor comienza a ser mayor que la curva de torque resistente, de modo que se tiene disponible, la mayor área formada por ambas curvas (hasta que la curva de torque resistente se hace mayor que la curva de torque motor) para acelerar el motor y su carga hasta la velocidad sincrónica y lograr la sincronización del motor con el nivel de flujo en el enrollado de campo obtenido durante el período de sincronización.

b) Conexión de la excitación con ángulo de torque de 180°. Los gráficos de torque, velocidad y flujo en el enrollado de campo se muestran en la Fig.10. En el momento de aplicar la excitación continua, el nivel de corriente inducida es de 0.45 (o/1) y el valor de flujo en el enrollado de campo es de -0.61 (o/1). Para lograr la sincronización en estas condiciones, el flujo debe invertir su polaridad y tener el mayor valor posible cuando el ángulo de torque comienza a tomar valores en la zona motor. Inmediatamente después de la aplicación de la alimentación continua, la velocidad continúa disminuyendo. Cuando el torque motor se hace mayor que el torque de carga, se acelera el conjunto hasta alcanzar incluso la velocidad sincrónica. No obstante, el flujo de campo en ese instante es insuficiente para, en las condiciones de operación existentes, lograr una sincronización exitosa. Se originan a continuación, ciclos de fuertes pulsaciones del torque motor y las respectivas variaciones en la velocidad.

- EFECTO DEL NIVEL DE VOLTAJE CONTINUO DURANTE LA SINCRONIZACION.

Se analizó el efecto de aumentar el voltaje de alimentación del enrollado de campo del motor, tomando como base el caso en el cual se conectó la excitación para un ángulo de torque de 180° sin lograr la sincronización del motor. El voltaje se aumentó en un 45% sobre el valor original y las curvas obtenidas se muestran en la Fig.11. Se aprecia en este caso, que al aplicar la excitación el flujo aumenta en forma más rápida lo que permite, después de algunas oscilaciones, alcanzar una sincronización exitosa.

En forma similar se analizó el efecto del torque resistente observándose que al aumentar éste a 1.015 (0/1), ya no se lograba la sincronización del motor para un ángulo de torque de 180°, a menos que se aumentara la excitación en un 66% de su valor original.

6.- COMENTARIOS FINALES

Se ha presentado un modelo para la evaluación de motores sincrónicos operando en régimen asincrónico. Con este modelo se ha analizado la incidencia de las principales variables que influyen en el proceso de sincronización.

De los resultados reportados se concluye la importancia de alcanzar la mayor velocidad posible antes de conectar la alimentación al campo, de aplicar la excitación para un ángulo de torque pequeño y máximo flujo inducido atrapado, y de aplicar la máxima tensión permisible al campo. La conjunción de estos factores dará la mejor situación para obtener éxito en la sincronización con un mínimo de perturbaciones hacia la red eléctrica.

Una limitante importante en la posibilidad de aplicar este modelo a situaciones industriales específicas es la carencia de los parámetros que se requieren para la evaluación. No obstante, la combinación de estas herramientas de análisis junto con registros experimentales del caso de interés, permite hacer un diagnóstico certero de la situación.

7.- REFERENCIAS

- [1] Valenzuela L., M.A.-Salamanca P.,H : "Determinación de las Características de Partida de Motores Sincrónicos a Partir de Variables de Diseño IX Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito-Ecuador, JIEE Vol. 9, 1988, pp:168-177.
- [2] Concordia, Ch. : "Synchronous Machines", John Wiley and Sons, 1951.

BIOGRAFIAS



M. ANIBAL VALENZUELA L.: Ing. Civil Electricista, U. de Chile, Magister en Ing. Eléctrica U. de Chile, 1978. Profesor Asistente del Dpto. de Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción. Areas de Interés: Accionamientos AC y DC, Estudios en Sistemas de Potencia Industrial.

ROBERTO FALCK C.: Ing. Civil Eléctrico, U.
de Concepción (1983). Ac-
tualmente se desempeña en desarrollo de Pro-
yectos Eléctricos para Sector Minero.

FRANCISCO SALAMANCA P.: Ing. Civil Eléctri-
co, U. Técnica del
Estado, Jefe Ingeniería Eléctrica, Superin-
tendencia Concentrador, CODELCO-DIV. Chuqui-
camata.