

Arranque de motores trifásicos. Efectos en la línea de alimentación

Narciso Moreno Alfonso

DPTO. INGENIERIA ELECTRICA. UNIVERSIDAD DE SEVILLA

1. Introducción

Como es sabido [2], el instante de la puesta en marcha de un motor trifásico de inducción puede tener efectos negativos en la línea de alimentación, y en los propios conductores del motor. Esto se debe a la gran sobretensión que puede llegar a absorber el motor, capaz de provocar caídas de tensión inadmisibles o incluso calentamientos peligrosos.

Para evitar estos inconvenientes, suele ser obligatorio disminuir el valor de dicha intensidad. Generalmente se emplean los siguientes métodos: estrella-triángulo, tensión variable, variador electrónico de tensión, resistencias rotóricas y convertidor de frecuencia.

Sin embargo, cada uno de los métodos enumerados tiene nuevas consecuencias tanto en la línea de alimentación como en el entorno, las cuales analizaremos en los siguientes apartados.

La mayoría de dichos métodos se basan en una reducción de la tensión en el instante del arran-

que. De este modo, y teniendo en cuenta el circuito equivalente aproximado [3] por fase del motor (Fig. 1), la intensidad absorbida por fase en el arranque viene dada por (1), si se desprecia la intensidad de la rama paralelo en dicho circuito y teniendo en cuenta que la resistencia de carga (R'_c) vale cero en ese instante.

$$I = V_e \cdot (R_{cce}^2 + X_{cce}^2)^{-1/2} \quad (1)$$

En el circuito de la figura 1, R_{cce} representa la resistencia por fase de los devanados, X_{cce} la reactancia por fase, R_{Fe} modela las pérdidas en el hierro y X_m la reactancia de magnetización.

Si se conecta el motor directamente a su tensión nominal, desarrollará un par de arranque que viene dado por (2), donde P_{mi} es la potencia mecánica interna del motor, n_c es la velocidad de sincronismo, s el deslizamiento, R'_2 la resistencia rotórica y V la tensión de alimentación por fase.

$$C = \frac{P_{mi} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_c} = \frac{3 \cdot V^2 \cdot R'_2 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_c \cdot s \cdot [(R_e + \frac{R'_2}{s})^2 + X_{cce}^2]} \quad (2)$$

La representación de la ecuación (2) se hace en la figura 2.a, y en la figura 2.b se muestran los valores reales de las curvas de par (C) y potencia (P) frente a la velocidad (n) en un arranque directo.

Teniendo en cuenta (1) y que $R'_c = 0$ en el instante de arranque, se comprueba que la intensidad absorbida puede llegar a



En este artículo se hace una revisión de los métodos de arranque de motores trifásicos de inducción más frecuentes, describiendo los efectos que cada uno de ellos provocan en la línea de alimentación. En el análisis, se han efectuado medidas reales de par, potencia y velocidad, con un dispositivo óptico portátil para la obtención del par motor, que hace posible la toma de datos sin interferir en ninguna conexión eléctrica o mecánica del motor a ensayar [1].

Figura 1. Circuito equivalente aproximado por fase

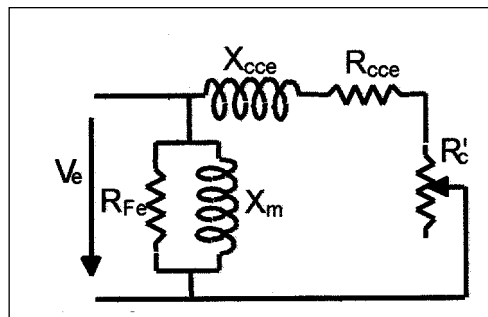
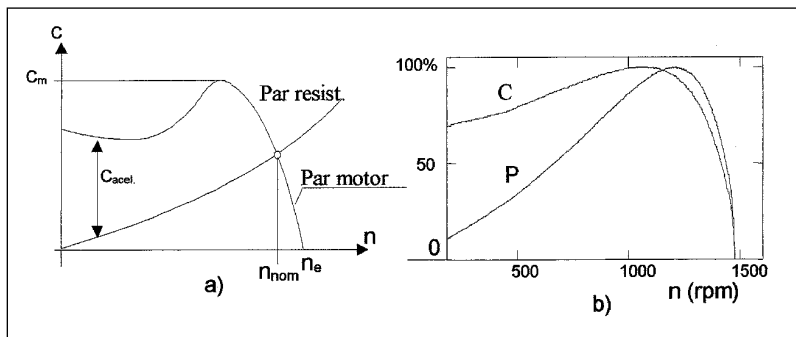


Figura 2.
a) Curva teórica par-velocidad.
b) Curvas reales de par y potencia.

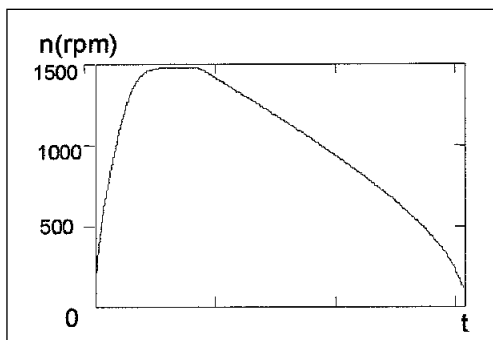


ser realmente elevada, al ser muy pequeña la impedancia del motor en ese instante. Por ello, el arranque directo sólo conviene ser usado en motores de pequeña potencia (3 kW). Si se alimentan en media tensión (6.000 V) puede realizarse una conexión directa para potencias de hasta 73.600 W. Este criterio es válido cuando el motor arranque libremente. Si lo hace en carga, hay que tener en cuenta que puede prolongarse en exceso el tiempo en el que se alcanza el régimen permanente, pudiéndose provocar con ello un sobrecalentamiento perjudicial para los conductores.

En la figura 3, se representa la evolución real de la velocidad durante el proceso de aceleración del motor con arranque directo, así como durante la parada al desconectarse la tensión de alimentación. La zona plana superior de la curva corresponde al funcionamiento en régimen permanente.

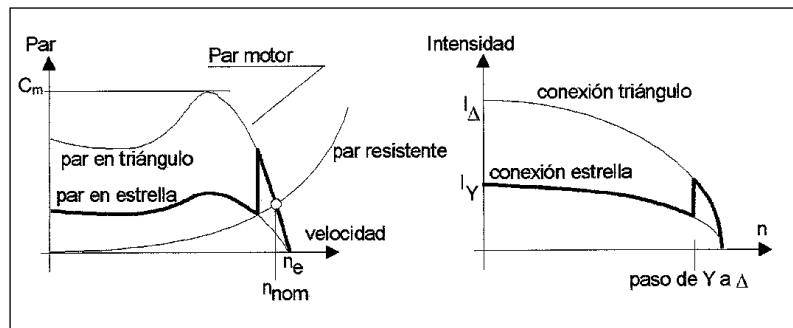
2. Arranque estrella-triángulo

Figura 3.
Evolución de la velocidad en el arranque directo



Consiste en alimentar el motor di-

Figura 4. Arranque estrella-triángulo. Curvas de par e intensidad.



rectamente de la red, pero conectado en estrella. De este modo, la tensión aplicada al estator es 1,73 veces inferior a la nominal y por tanto la intensidad y el par de arranque serán también inferiores en la misma proporción. Una vez alcanzado el punto de trabajo para la conexión en estrella, se conecta en triángulo. En ese instante se produce una elevación brusca de tensión que provocará una sobreintensidad apreciable. La curva teórica par-velocidad se representa en la figura 4.

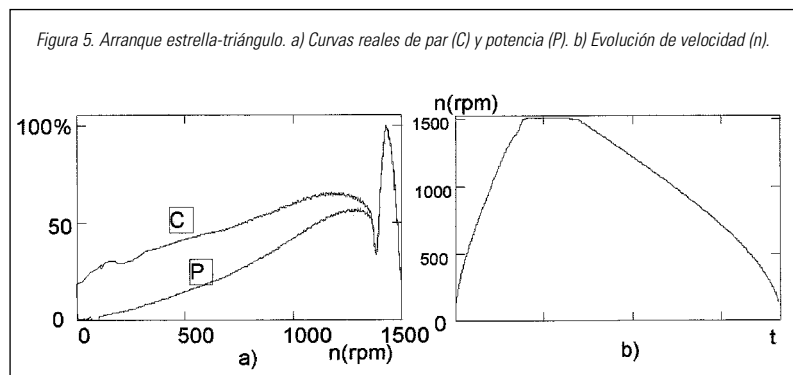
Tanto la intensidad en el arranque como la obtenida en el paso de estrella a triángulo, son menores que la sobreintensidad que se tendría con un arranque directo. El arranque se hace de forma escalonada, en dos tiem-

pos. En la figura 5.a se representan las curvas reales de par y potencia frente a la velocidad y en la figura 5.b, la evolución de velocidad en el proceso de arranque y parada.

La intensidad absorbida en el instante del arranque se muestra en la figura 6.a, la evolución completa de la intensidad viene dada por el oscilograma de la figura 6.b y un detalle del instante de la conmutación estrella-triángulo aparece en la figura 6.c.

Este tipo de puesta en marcha es una alternativa cuando no puede emplearse el arranque directo, aunque no siempre puede utilizarse. En primer lugar, el motor debe poderse conectar en triángulo a la tensión de la línea.

Figura 5. Arranque estrella-triángulo. a) Curvas reales de par (C) y potencia (P). b) Evolución de velocidad (n).



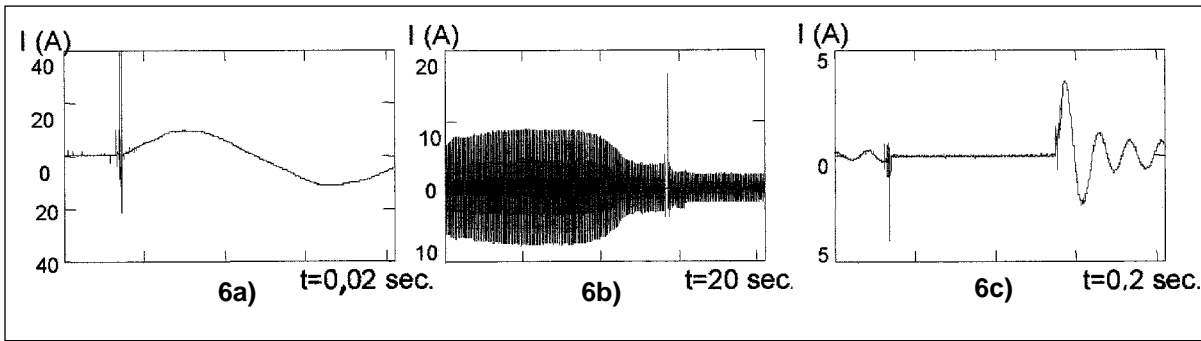


Figura 6.
Figura 6a. Intensidad inicial.
Figura 6b. Arranque completo.
Figura 6c. Conmutación estrella-triángulo.

En segundo lugar, si el motor tiene acoplada una carga con un par resistente elevado, puede que la disminución de tensión provocada por la conexión en estrella provoque un par de arranque inferior al resistente, con lo que el motor no podría iniciar la marcha.

Por otro lado, para realizar el arranque estrella-triángulo es preciso disponer de un conmutador que haga las conexiones necesarias. Este dispositivo no suele ser caro, por lo que se convierte en un método de arranque brusco, pero sencillo y barato. También puede automatizarse utilizando un autómatas que gobierne los contactores necesarios para las conexiones estrella y triángulo.

Los picos de intensidad provocados en el arranque y en la conmutación estrella-triángulo provocan perturbaciones en dispositivos electrónicos cercanos, aunque de escasa consideración y mínima duración.

3. Arranque con tensión variable

Algunos autores denominan a

este método arranque por auto-transformador, por el hecho de emplear un autotransformador para regular la tensión aplicada al motor. Se basa igualmente en la disminución de tensión en el instante del arranque, para aumentarla progresivamente una vez que el motor se encuentra en movimiento. Para ello, se conecta el motor a través de un transformador variable o regulador de tensión. En la figura 6 aparecen las curvas teóricas de par y de intensidad en función de la velocidad del motor.

Las curvas reales de par y potencia para este tipo de arranque se muestran en la figura 7.a. La limitación de intensidad depende de la tensión inicial utilizada para el arranque y de los valores de tensión utilizados en las distintas etapas. En la figura

7.b se muestra la evolución real de velocidad en el proceso de arranque y parada con el método de variación de tensión.

La evolución de intensidad en el proceso de arranque es similar a la que tiene lugar en el arranque estrella-triángulo, aunque con la posibilidad de cambios más suaves. Además se eliminan las perturbaciones provocadas por conmutación. Sin embargo, es preciso disponer de un regulador para la tensión de alimentación, en lugar de un conmutador, lo que supone un coste mayor.

4. Arranque con variador electrónico de tensión

El procedimiento de arranque es

Figura 7.
Arranque con tensión variable.
a) Curvas reales de par y potencia.
b) Velocidad.

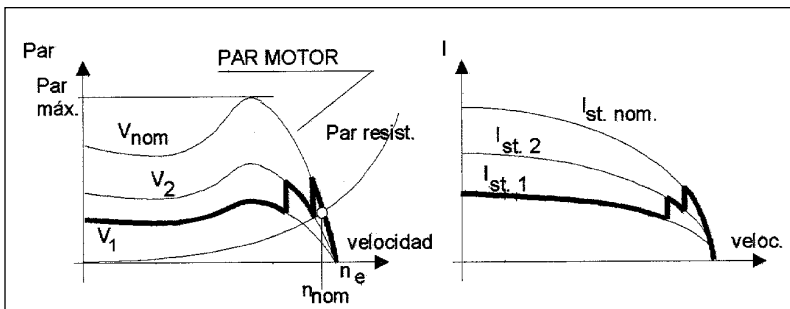
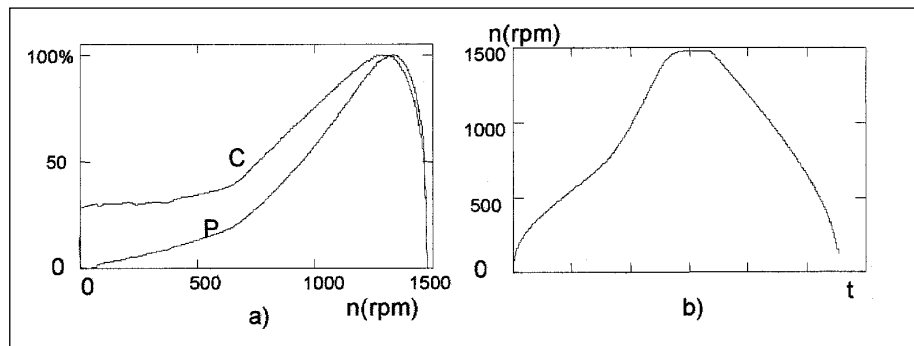


Figura 8.
Curvas teóricas con tensión variable

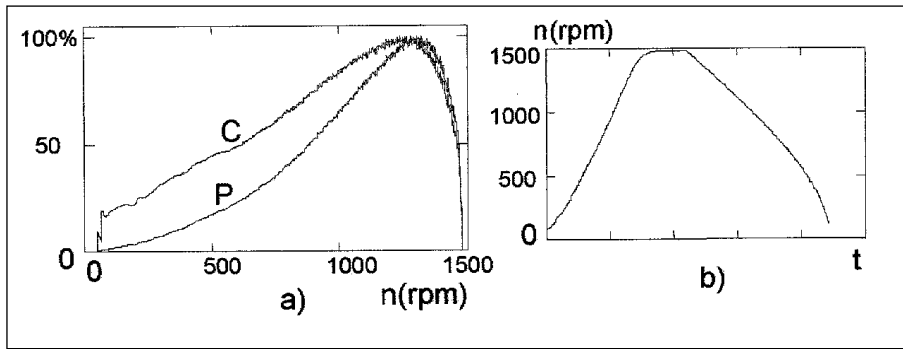


Figura 8. Arrancador estático.
a) Curvas reales de par y potencia.
b) Velocidad.

el mismo que con el método anterior, pero en vez de utilizarse un regulador accionado manualmente, se utiliza un variador de tensión electrónico (arrancador estático). Este consta de una unidad de potencia formada por un puente rectificador totalmente controlado encargado de variar el valor eficaz de la onda de tensión. También posee una unidad de control por microprocesador, que gestionará el funcionamiento de la unidad de potencia, según la evolución de tensión deseada. En la figura 8.a se representan las curvas reales de par y potencia, mientras que la evolución de velocidad se muestra en la figura 8.b.

La intensidad absorbida por el arrancador en el instante del arranque, conectado directamente a la línea de alimentación, se muestra en el oscilograma de la figura 9.a. En la figura 9.b, se tiene la evolución de la intensidad a lo largo de todo el proceso de arranque. La forma de onda de la intensidad absorbida por el arrancador en régimen permanente queda ilustrada por el oscilograma de la figura 9.c. Como puede observarse, la intensidad absorbida no es

Figura 9. Intensidad absorbida con arrancador estático.
a) Instante inicial.
b) Arranque completo.
c) Régimen permanente.

perfectamente senoidal, por lo que el uso de este dispositivo es una fuente inevitable de armónicos, al menos durante el proceso de arranque. Esto puede provocar una distorsión importante tanto en la línea como en otros equipos. Sin embargo, muchos de estos arrancadores incorporan la opción de hacerles un *bypass* cuando se ha completado el arranque, con lo que la intensidad absorbida es directamente la de la red de alimentación.

5. Arranque por resistencias rotóricas

En este caso, la limitación de intensidad en el arranque se hace aumentando la impedancia del motor, según se deduce de (1). Para ello, el motor se alimenta directamente de la red a la tensión nominal, aunque previamente se han conectado en serie con los devanados rotóricos sendas resistencias variables. De esta forma, la resistencia resultante (R'_{ccc}) es mayor que la original y la intensidad absorbida será menor.

Conforme el motor va ganando velocidad, puede disminuirse

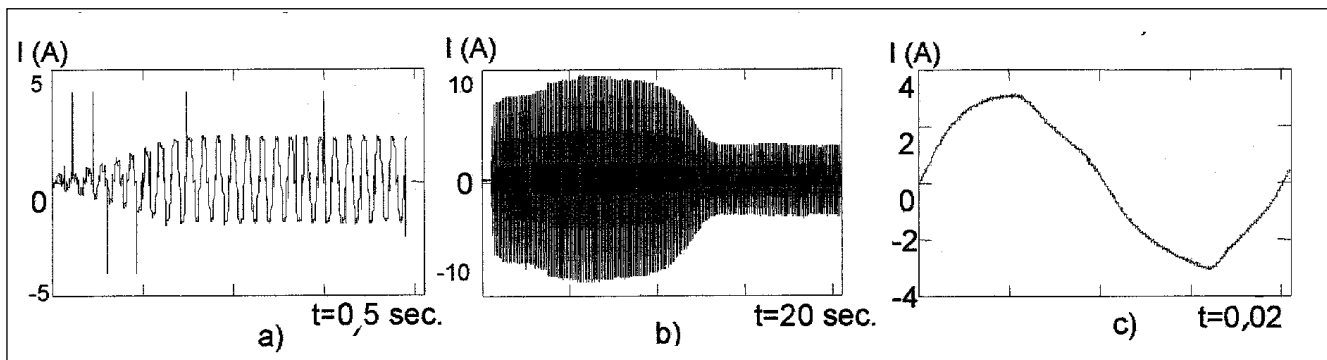
progresivamente la resistencia externa hasta llegar a cortocircuitar los devanados, instante en que el motor funciona en condiciones nominales. Evidentemente, este método no puede utilizarse en los motores de jaula de ardilla, sino en los de anillos deslizantes o de rotor devanado.

En la figura 10 se muestran las curvas teóricas de par y de intensidad frente a la velocidad. Se han representado tres variaciones de resistencia. Como se deduce a partir de la expresión (2), el par máximo no varía al modificar el valor de la resistencia total. Esto puede suponer una ventaja en la utilización de este método, puesto que así no influye el hecho que el motor haya de vencer un par resistente elevado en el arranque.

En la figura 11.a se muestran los valores reales de par y potencia frente a velocidad. La curva de velocidad se representa en la figura 11.b.

La figura 12.a muestra un oscilograma de la intensidad absorbida por el motor en el instante del arranque. Según se observa existe un pico de intensidad, aunque limitado debido al aumento provocado en la resistencia rotórica. La evolución de la intensidad durante el proceso completo de arranque se representa en el oscilograma de la figura 12.b. Los aumentos bruscos de intensidad se deben a disminuciones bruscas de resistencia.

Este método tiene la ventaja añadida de permitir una variación de velocidad en el motor según se



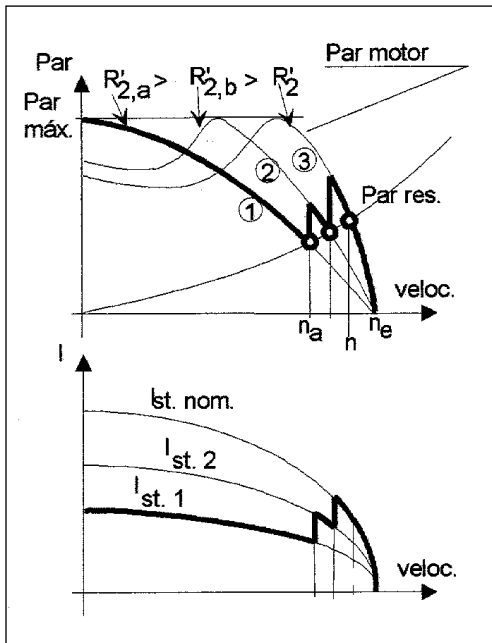


Figura 10. Arranque con resistencias rotóricas. Curvas de par e intensidad.

deduce de la figura 10. No obstante, variar la velocidad con este procedimiento, o bien mantener una situación prolongada de funcionamiento con resistencias conectadas en el rotor, implica un aumento del deslizamiento del motor y por tanto un calentamiento indeseable del mismo que puede reducir su vida útil.

6. Arranque con convertidor de frecuencia

En este caso, la limitación de intensidad se basa en hacer que el motor siempre desarrolle justamente el par que la carga solicita a cualquier velocidad. Para ello se alimenta el motor con un convertidor de frecuencia, que aplica una tensión de frecuencia variable (Fig. 13.a). El principio de funcionamiento suele ser el denominado PWM (*Pulse Width Modulation*).

Para mantener el valor de par (2), el convertidor varía la tensión además de la frecuencia, de forma que se mantenga constante la relación tensión/frecuencia. En la figura 13.b se representan las curvas de par motor para distintas frecuencias.

La puesta en marcha del motor se realiza aplicando una fre-

cuencia progresivamente creciente desde cero. La tensión también aumenta progresivamente desde cero. Sin embargo, la intensidad absorbida en el arranque tiene un valor próximo al de trabajo, puesto que el par (que depende del flujo [4]) se mantiene en su valor nominal al mantenerse constante la relación tensión/frecuencia y la tensión inicial es reducida.

Las curvas reales de par y potencia desarrolladas por el motor pueden verse en la figura 14.a, junto a la curva real de velocidad en la figura 14.b.

La intensidad absorbida por el motor en el instante del arranque, puede verse en el oscilograma de la figura 15.a. En dicho instante, el convertidor suministra una corriente de baja frecuencia. Así, si la frecuencia de troceado es fija [5], la reproducción de la onda modelo es más fiel, y esto hace que la corriente tenga un aspecto más senoidal.

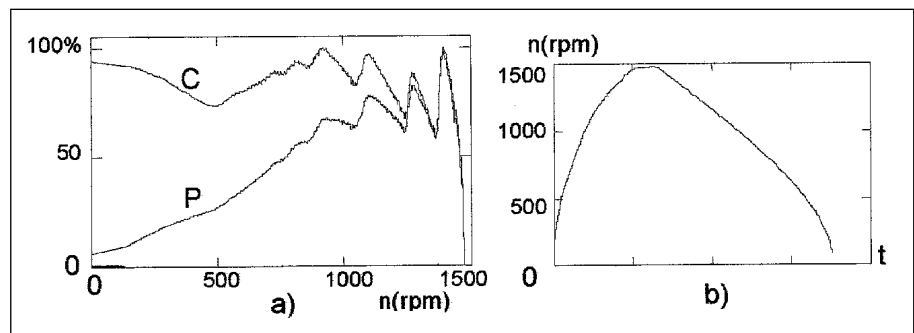
La figura 15.b muestra la intensidad absorbida por el motor durante el proceso completo de arranque hasta alcanzar el

régimen permanente. Aunque el oscilograma sólo representa los 0,5 primeros segundos, la onda permanece casi sin variación hasta el final del arranque.

En las figuras 15.c y 15.d se muestran las intensidades absorbidas por el motor y el convertidor de frecuencia en régimen permanente, respectivamente. Cuando se genera la onda a 50 Hz, la reproducción de la onda modelo senoidal no es tan fiel, por lo que la corriente suministrada por el convertidor presentará una cantidad de armónicos elevada, como se observa en el oscilograma.

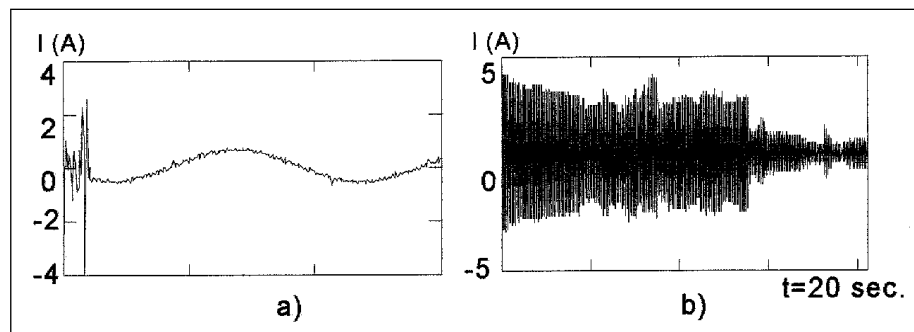
Para evitar esto, algunos convertidores de frecuencia ajustan automáticamente la frecuencia de troceado. Los más modernos, permiten modificar la frecuencia de troceado para fijarla en un valor suficientemente elevado, sin que pertenezca al margen audible, y que permita generar una corriente con menos armónicos.

Aparte de los obvios inconvenientes que presenta el convertidor de frecuencia respecto a la inyección de armónicos en la red, es un dispositivo realmente



▲ Figura 11. Arranque con resistencias rotóricas. a) Curvas reales de par y potencia. b) Velocidad.

▼ Figura 12. Intensidad con resistencias rotóricas. a) Transitorio inicial. b) Arranque completo.



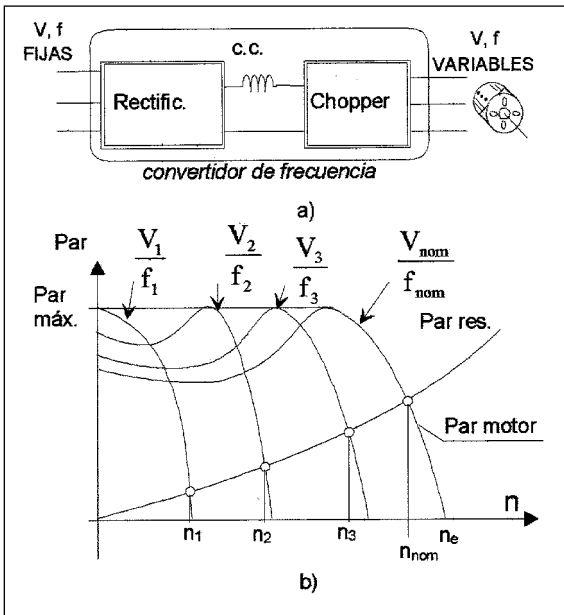


Figura 13. a) Conexión del convertidor de frecuencia. b) Curvas de par a distintas frecuencias.

interesante en buena parte de las aplicaciones. En primer lugar, debido al avance de la electrónica de potencia, pueden adquirirse en una amplia gama de potencias y a un precio muy asequible, incluso integrado en algunos tipos de motores. Indudablemente, para aplicaciones en las que se requiera un control de velocidad (regulación de caudales, bobinadoras, cintas transportadoras, etc.), son altamente eficaces. Además de limitar la intensidad en el arranque, hay aplicaciones que requieren un arranque progresivo, como en la

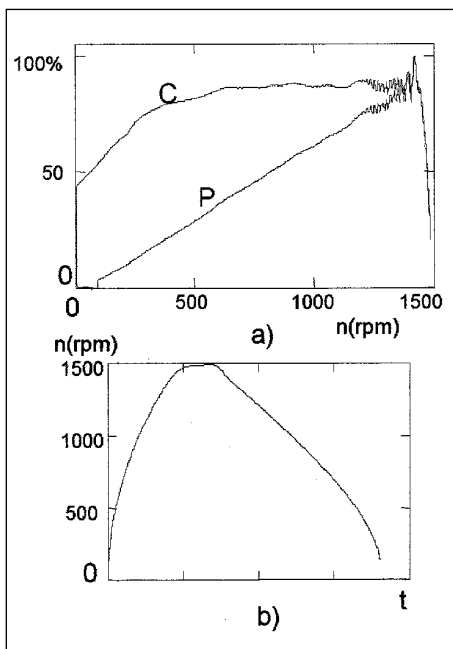


Figura 14. a) Curvas reales de par y potencia con convertidor de frecuencia. b) Velocidad.

puesta en marcha de grandes bombas, para eliminar los golpes de ariete. En tales aplicaciones, suele ser una buena inversión el convertidor de frecuencia.

Entre otra de sus ventajas, se encuentra el hecho de que mantiene el par máximo del motor siempre constante [6], lo cual permite que el motor pueda vencer el par resistente para el que ha sido calculado, a cualquier velocidad (Fig. 13.b).

7. Conclusiones

Cuando no se necesita una regulación o una simple variación de velocidad, el arranque estrella/triángulo suele ser el procedimiento más común. Si la intensidad de arranque es excesivamente elevada, puede ser interesante contemplar el uso de un arrancador estático.

En general, los métodos como el primero, tienen el inconveniente de que los picos de intensidad en las conmutaciones producen interferencias y perturbaciones transitorias en la línea de alimentación, aunque de corta duración.

Los métodos de arranque con dispositivos electrónicos, presentan el inconveniente de que las perturbaciones citadas son de mayor envergadura, aunque en algunos casos sólo limitadas al proceso de arranque. Sin embargo, las interferencias pueden hacerse mínimas si se garantiza una adecuada compatibilidad electromagnética (EMC). Los armónicos también pueden minimizarse externamente, aunque en menor medida.

8. Bibliografía

- [1] Simon Sempere, V. et al., "Determinación en carga de las características mecánicas de accionamientos eléctricos", Proc. III Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Barcelona, págs. 239-246 (1993).
- [2] Chapman, S.J., "Máquinas Eléctricas". McGraw-Hill, Madrid, 1ª ed. (1989).
- [3] Sanjurjo Navarro, R., "Máquinas Eléctricas", McGraw-Hill, Madrid, 1ª ed., (1989).
- [4] Slemon, G. R., "Electric Machines and Drives", Addison Wesley, USA, 2ª ed., (1992).
- [5] Bladbjerg, F. y Pedersen, J. K., IEEE on Power Electronics, 3, 567-577 (1997).
- [6] Kassakian, J.G., Schlecht, M. F. y Verghese, G.C. "Principles of Power Electronics", Addison Wesley, USA, 2ª ed., (1992).

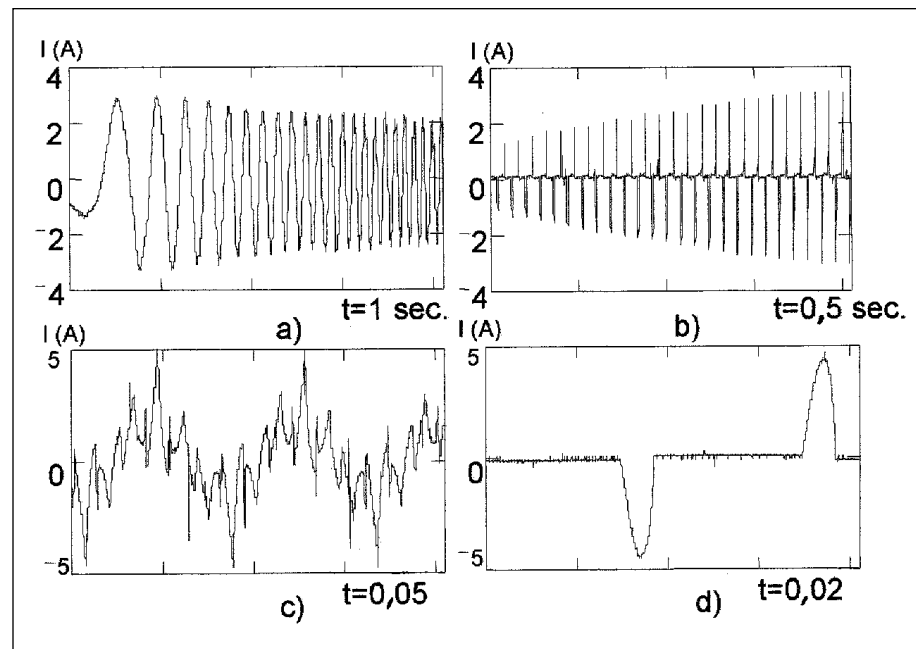


Figura 15. Intensidad absorbida por el motor. a) Instante inicial. b) Arranque completo. c) Régimen permanente. d) Intensidad en la línea, en régimen permanente