



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# El Arrancador Electrónico. Aplicación y repercusiones sobre el funcionamiento de los motores de inducción

<b>Apellidos, nombre</b>	Roger Folch, José (jroger@die.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Ingeniería Eléctrica
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Valencia



## 1 Resumen

Los “arrancadores electrónicos” (o arrancadores estáticos) son los que hoy en día más crecen en importancia en implementación en la industria, sin embargo suelen ser unos desconocidos para cualquier técnico de reciente titulación. Con este artículo se plantea de forma sencilla la forma usual de utilización, así como las repercusiones que tiene su uso.

Con este trabajo se estudia de forma sencilla las partes que componen este equipo, se analizan de forma básica el modo de funcionamiento para el control que realizan. Se estudian las forma de onda tanto a la entrada como a la salida del equipo.

Además se exponen los ejemplos de conexionado más comunes que se utilizan en las aplicaciones industriales convencionales. Todo ello sin entrar en las expresiones matemáticas que puedan distraer al alumno del cometido principal del trabajo.

## 2 Introducción

La incorporación a la industria de la electrónica de potencia al control de las máquinas eléctricas y sus efectos sobre las instalaciones eléctricas ha evolucionado mucho en los últimos años. Esto ha permitido desarrollar una serie de equipos adaptados a los requerimientos industriales.

En las diferentes carreras técnicas se suelen estudiar por separado por un lado los equipos de control de potencia electrónicos y por otro lado la repercusión de los motores eléctricos sobre las líneas propias de alimentación, es decir sobre la instalación eléctrica. Desde el punto de vista pedagógico es difícil localizar ejemplos de aplicación industrial que clarifiquen e identifiquen las ventajas e inconvenientes del uso conjunto de este tipo de equipos.

## 3 Objetivos

Se pretende estudiar mediante ejemplos de aplicación, las peculiaridades y repercusiones que puede tener en una instalación industrial el empleo de un accionamiento eléctrico del tipo de un arrancador electrónico. Para ello es necesario:

- Analizar el funcionamiento básico de las etapas de potencia de un arrancador estático (o arrancador electrónico) para identificar las principales fuentes de perturbaciones que genera el mismo.
- Identificar el efecto que tiene en las prestaciones del motor el tipo de onda que genera un arrancador electrónico.
- Determinar el impacto que tiene la “calidad de suministro” de la red eléctrica de alimentación el empleo de un arrancador electrónico.

Se van a desarrollar una serie de medidas que permitan llevar a cabo los análisis necesarios que inciden tanto en las nuevas tendencias del suministro eléctrico



como en el control industrial de las máquinas eléctricas más usuales, como son los motores de inducción o motores asíncrono con rotor en jaula de ardilla.

Por último se presenta una serie de conclusiones de todos los análisis efectuados en este trabajo, de manera que los lectores puedan tener la capacidad suficiente para poder determinar la utilización adecuada de los equipos estudiados en este artículo.

## 4 Desarrollo

Se desarrolla el artículo siguiendo las pautas planteadas en los objetivos, por lo que se repasan los conceptos básicos de manera que el alumno puede seguir sin dificultad toda la exposición.

### 4.1 Necesidad de controlar el arranque de un motor asíncrono

Una gran cantidad de receptores empleados en las industrias y también en entornos cercanos a las propias viviendas (ascensores, bombas de agua, etc) son los motores asíncronos de jaula de ardilla. En este tipo de máquinas eléctricas, por su constitución y construcción, la corriente que puede llegar a demandar en el arranque es de entre 4 y 10 veces la corriente normal de funcionamiento. El funcionamiento básico y aproximado de aplicación de este tipo de máquinas queda recogido mediante la ecuación 1 en cuanto a la corriente absorbida de la red y la ecuación 2 en cuanto al par (T) electromagnético desarrollado. Como llegar a estas expresiones queda fuera del alcance de este texto, consúltese textos de máquinas eléctricas rotativas.

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_{cc}^2}}$$

*Ecuación 1. Definición de la corriente absorbida por la red.*

$$T = \frac{3}{2 \cdot \Omega_{\sin}} \cdot \frac{U_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

*Ecuación 2. Definición del Par desarrollado.*



Hay una serie de valores que pueden considerarse prácticamente como constantes, tales como son la tensión de alimentación ( $U_1$ ), los parámetros del motor (según esta expresión) como son sus impedancias internas ( $R_1$ ,  $R_2$  y  $X_{cc}$ ), la velocidad a la que gira el campo magnético ( $\Omega_{sin}$ ), denominado como velocidad de sincronismo, que se fija constructivamente mediante el número de pares de polos magnéticos. Pero sin embargo la variable "s" (denominada deslizamiento) varía desde un valor "1" en el instante inicial del arranque hasta un valor cercano a "0" (entre el 1 y el 3%) en el instante de funcionamiento convencional.

Como se puede observar, en los motores convencionales, ya construidos, ambos parámetros (corriente de carga y par motor disponible) dependen de la tensión de alimentación, por lo que su control y regulación permite determinar el funcionamiento del motor, así como las repercusiones que puedan tener sobre las propias redes de alimentación a dichos motores como a los receptores que se encuentren alimentados por la misma línea eléctrica.

Por tanto es fundamental conocer las actuaciones a tomar sobre la tensión de alimentación de cara al control de la máquina eléctrica. En muchas aplicaciones industriales se necesitan adaptar tanto la corriente de arranque como el par disponible, o lo que es lo mismo hay que adaptar la tensión de alimentación. Dos ejemplos clarificadores de este tipo de actuaciones podrían ser:

- En cuanto a la corriente, hay muchas aplicaciones de motores eléctricos asíncronos en jaula de ardilla en las que la corriente de arranque de un motor provoca unas caídas de tensión excesivas en la línea. Pudiendo dejar a la línea de alimentación del propio motor y otras cargas, fuera de norma. Para solventar este problema se dota al sistema de un método de arranque que limite esa caída de tensión. La práctica totalidad de actuaciones para resolver este incidente se hacen a base de reducir la tensión aplicada a la máquina. Un método moderno y apropiado para esta reducción es la utilización del arrancador electrónico.
- En cuanto a la regulación del par motor, también hay situaciones industriales que demandan este tipo de control, por ejemplo, en el sector de la industria de fabricación de muebles y tratamiento de la madera, existe una máquina denominada "aserradora", que se utiliza para trocear maderas de gran tamaño a tamaños adecuados para su elaboración. Estas máquinas son básicamente dos volantes metálicos con una inercia muy importante y unidos mediante una cinta de acero que es realmente la sierra. Si al iniciar el movimiento, se aplica todo el par motor disponible en el arranque la cinta se partiría, por lo tanto hay que efectuar el arranque con una sensible disminución del par motor.

Ambas situaciones descritas requieren de un control de tensión (ver ecuaciones 1 y 2), y para ello puede estar indicado el empleo del arrancador. El modo básico de funcionamiento de este equipo de control industrial, se describe en el apartado 4.2.



## 4.2 Funcionamiento básico de un arrancador electrónico

Como se ha comentado estos equipos deben de poder regular la tensión que aplican al motor que controlan. Pero cuando de forma general en la industria eléctrica se hace referencia a la tensión de alimentación, realmente se está haciendo referencia a la tensión eficaz (valor máximo que alcanza la tensión dividido por raíz de dos, " $U_{max}/\sqrt{2}$ "), tanto sea monofásica como trifásica, ver figura 1, donde para redes de 50 hercios (las convencionales en Europa) el tiempo " $t$ " que dura un ciclo completo ( $2\pi$ ) es de 20 milisegundos.

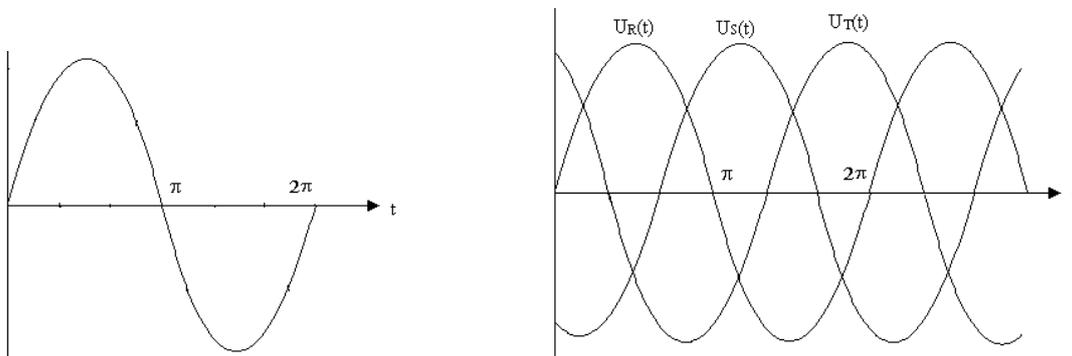


Figura 1. Formas de onda de un sistema eléctrico, monofásico y trifásico

Así pues si se pretendiese aplicar una tensión menor, desde una red de distribución convencional, solo habría que recortar parte de dicha senoidal. Por ejemplo, en la figura 2, se puede observar dos maneras de recorte de la senoidal. La onda de la izquierda sería un ejemplo básico de recorte de la tensión regulada o disminuida, que se podría llevar a cabo con un puente de tiristores en anti-paralelo, los cuales se dispararían con un determinado ángulo de retroceso del paso por cero de la onda de tensión (ver textos de electrónica y aplicación de tiristores).

De modo general, los arrancadores electrónicos, actúan aplicando un recorte de la onda de tensión tal como se puede apreciar en la gráfica de la derecha de la figura 2. Con este método (un poco más complejo desde el punto de vista del control del tiristor), se obtiene con un pequeño ángulo de desconexión una efectividad mayor, por tanto es usual este último tipo de control

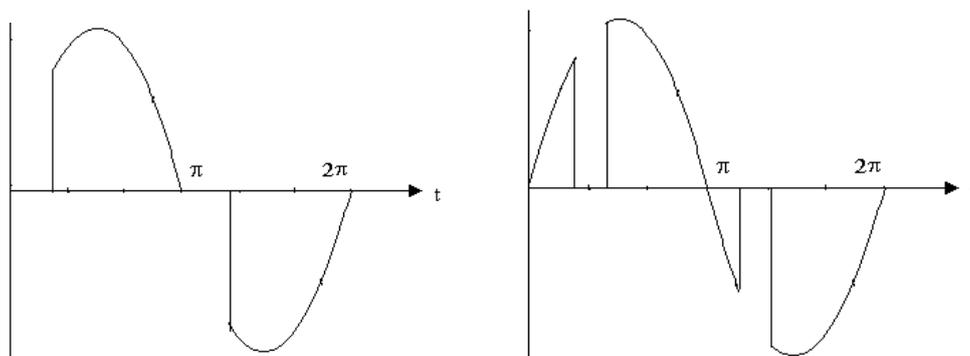


Figura 2. Formas de onda recortadas para disminuir la tensión



La etapa de potencia convencional de un arrancador tiene una configuración tal como se muestra en la figura 3, es decir, dispone de 2 tiristores en anti-paralelo para cada una de las fases de control (normalmente son utilizados en motores trifásicos). Además de la etapa de potencia, disponen de otra compleja circuitería de control basada en la electrónica, pudiendo incorporar en muchos modelos hasta una CPU. Tanto un tipo de control como el otro es el encargado de ordenar el disparo de cada uno de los tiristores en función de unos valores de referencia que se le aportan externamente al equipo de control y que en todo caso vendrán referenciados según las características del motor y otros parámetros a considerar en cada una de las posibles aplicaciones.

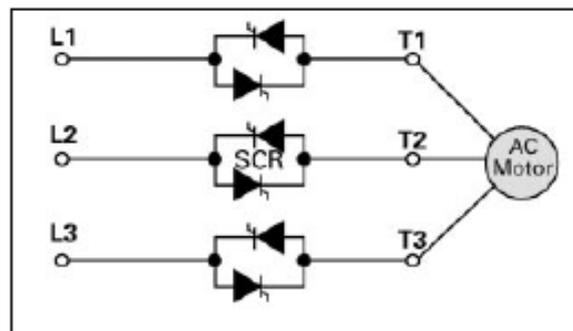


Figura 3. Puente de tiristores convencional de un arrancador electrónico

A veces, incluso, pueden trabajar estos equipos con más de un único recorte por semionda, lo que puede llevar a tipos de onda (de salida del arrancador) más compleja. Analizarlas no aportaría nada desde el punto de vista pedagógico, por lo que no se incluyen. Para el caso que nos ocupa, la señal teórico-práctica que se obtendría sería la que viene representada en la figura 4, tanto a nivel de tensión como de corriente.

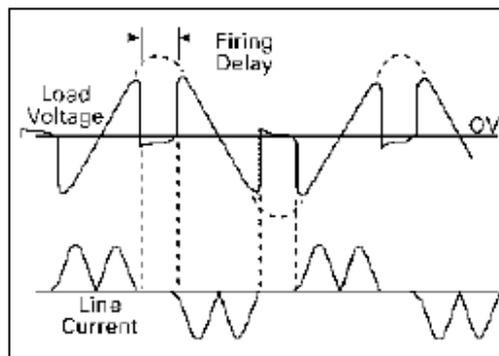


Figura 4. Forma de onda esperada a la salida del arrancador electrónico

Para otros tipos más complejos de regulación la onda que se obtendría sería parecida pero con mayor número de interrupciones en cada senoide.



### 4.3 Ondas obtenidas en una aplicaci3n real

Si se hiciese una aplicaci3n, donde se obtuviese la tensi3n y corriente que se establecen entre el arrancador y el motor alimentado por este equipo, las ondas que se obtendr3a para un equipo comercial son las de la figura 5. En ambas gr3ficas la onda de corriente es la superior y la onda de tensi3n es la inferior. Se han obtenido las gr3ficas en dos momentos representativos del proceso de arranque, uno en el instante inicial (gr3fica de la izquierda) y otra cuando el motor controlado est3 pr3cticamente terminado el transitorio del arranque.

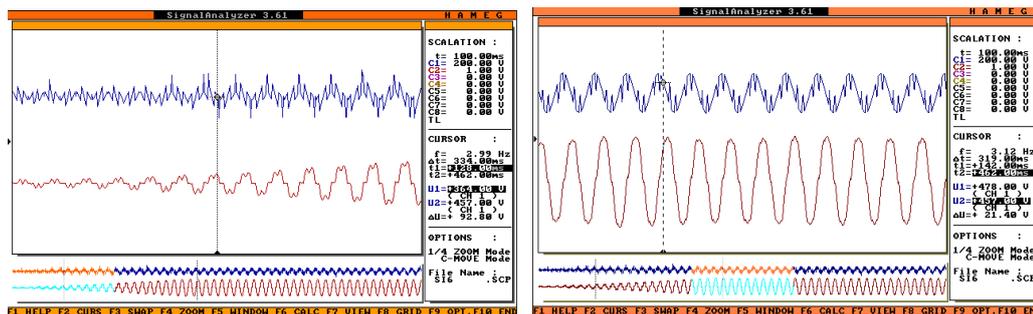


Figura 5. Forma de onda esperada a la salida del arrancador electr3nico.

As3 en la figura de la izquierda (momento inicial del arranque) se puede apreciar que el valor de tensi3n aplicado es muy peque1o, y pr3cticamente el recorte de la onda es muy importante. En cuanto a la corriente, su comportamiento es el cl3sico que se obtiene al alimentar a una bobina (o grupo de bobinas) mediante una red no senoidal e interrumpida, es decir cuando le llega tensi3n dicha bobina se carga y cuando se produce la interrupci3n la bobina tiende a descargarse. Este comportamiento genera una serie de perturbaciones al motor, que es alimentado, se le genera una serie de "ruidos electromagn3ticos". Esto tiene una incidencia muy importante en lo que se conoce como calidad de la energ3a el3ctrica, ya que este tipo de se1ales (tanto en corriente como en tensi3n) son portadoras de una gran cantidad de arm3nicos. Estos arm3nicos es una de las causas que producen esa falta de calidad en la energ3a el3ctrica.

En la gr3fica de la derecha, lo que se ha obtenido son los valores de tensi3n y corriente pero pr3cticamente cuando el motor ya est3 en r3gimen nominal (es decir, funcionando a la velocidad de normal de trabajo). En este caso se entiende que el arranque est3 pr3cticamente terminado, por lo que ya no se necesita recortar el valor de la tensi3n. No obstante a3n se puede apreciar que siguen actuando los tiristores debido a que se puede apreciar en la gr3fica de la corriente los puntos de discontinuidad.

Si se obtuviese otra muestra correspondiente al funcionamiento en r3gimen de trabajo del motor, se podr3a observar que las gr3ficas son totalmente senoidales tanto la de tensi3n como la de corriente. Adem3s, con un 3nico arrancador se puede efectuar un arranque controlado de varios motores. Esta situaci3n es poco probable en la industria porque realmente servir3a para un posible abaratamiento de la instalaci3n, pero por el contrario genera sobre costes por necesidad de utilizar m3s contactores, y el ahorro real en el coste es m3nimo. Por lo que normalmente, cada motor que necesite de estas t3cnicas de control lleva su propio equipo.



## 4.4 Opciones en el control de los arranques mediante un arrancador electrónico

Como ya se ha indicado anteriormente, las etapas de control de un equipo de este tipo pueden ser implementadas mediante una conjugación de elementos electrónicos por lo general bastante complejos, o incluso con la ayuda de una CPU. Por lo tanto como se dispone de elementos de control, que en general permiten ser programados, mediante la variación de una serie de parámetros se le puede indicar a las etapas de potencia que actúen de diferente forma, o lo que es lo mismo, se puede efectuar con un mismo equipo y a un mismo motor diferentes formas de arranque. Naturalmente cada equipo y cada marca tiene sus propias características, pero todos en general permiten adecuar el nivel de tensión en cada instante del arranque, con lo que se puede ajustar tanto el nivel de corriente como el nivel de par disponible en cada aplicación o incluso en cada arranque.

La característica fundamental que suele prevalecer en este tipo de aplicaciones es la programación de la curva de arranque formada por las variables corriente/tiempo de duración. Así se puede obtener un gran número de pendientes de arranque con estos dos parámetros regulados, ver en la figura 6 la gráfica de la izquierda, donde aparecen hasta tres posibles rectas o pendientes de arranque.

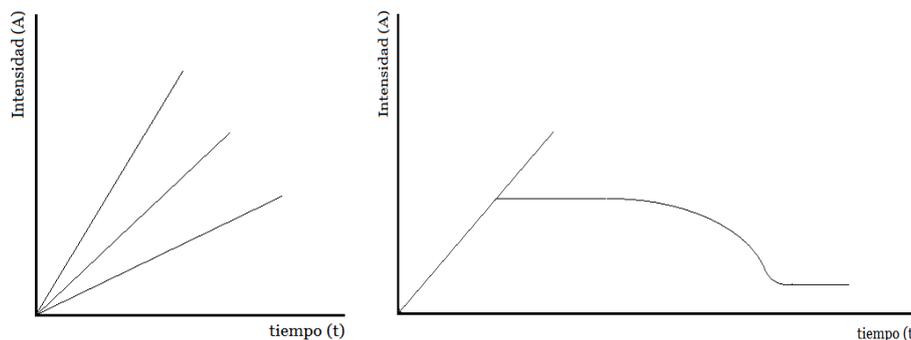


Figura 6. Tipos de arranque a implementar con un arrancador electrónico

Pero no siempre la aplicación permite cualquier pendiente de arranque ya que hay que tener en cuenta que el conjunto motor-máquina de arrastre (lo que se conoce como par de arranque y par de arrastre) tiene una inercia que puede no ajustarse a los requerimientos planteado de inicio. En ese caso, y de forma general, prevalece la máxima corriente permitida durante el arranque con lo que el arrancador electrónico inicia el control atendiendo a la curva ajustada y al alcanzar el valor máximo permitido de corriente, se "olvida" de la pendiente programada y prevalece el límite de corriente. Es decir la respuesta del arrancador se ajustaría a la gráfica de la derecha, donde en principio se ajusta a la pendiente solicitada y al alcanzar un valor máximo de corriente, la evolución es la de una recta horizontal (olvidándose de la variable tiempo "t"), hasta que el motor consigue llegar aproximadamente a la velocidad de régimen de trabajo, que por lo general provoca una disminución importante en el valor de la corriente.

Un ejemplo práctico de dos casos de modos de arranque con pendientes diferentes pero ambos con límite de corriente, pueden ser los de las gráficas de la



figura 7, en las que hay que prestar especial atención a las dos ondas de arriba que son las que están oscilografiando el valor de la corriente entregada al motor. En el valor de la tensión se puede intuir que inicialmente la densidad de líneas es menor al principio del arranque lo que permite intuir que se trata de valores recortado de tensión.

También se deja de manifiesto en las gráficas de corriente que la demandada es muy superior a la que posteriormente queda establecida como corriente de funcionamiento en régimen de trabajo en la aplicación del ensayo.

Se puede llegar incluso a obtener curvas de arranque en las cuales la pendiente programada no llegue a alcanzar el valor máximo de corriente permitida. En estos caso no existiría ningún tipo de recorte en la pendiente del arranque, aunque normalmente al utilizar un arrancador es porque se necesita poner límite a la corriente o al par de arranque, dado que en el caso contrario se arrancararía de forma directa y sin necesidad de añadir ningún tipo de elemento que encareciera la instalación.

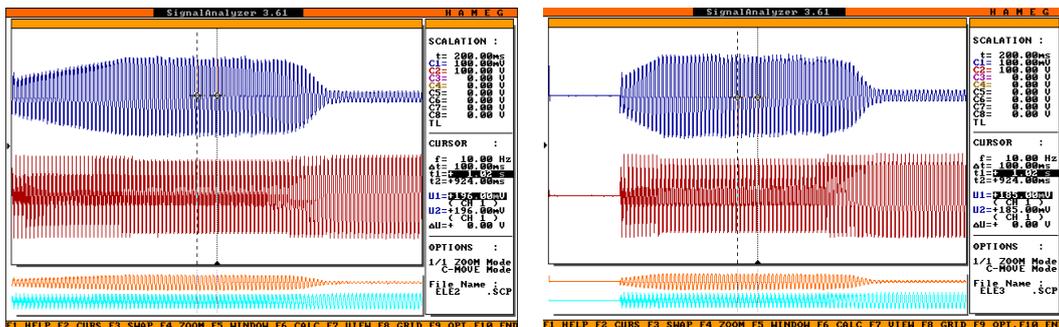


Figura 7. Tipos de arranque experimentales con un arrancador electrónico.

## 4.5 Métodos de programación o selección del tipo de arranque

El modo de acceder a la programación de este tipo de equipos puede ser muy diferente entre un modelo y otro de una misma marca, o entre diferentes equipos y fabricantes. Se pueden encontrar en el mercado equipos que permiten conectarse a un PC y desde un software suministrado por el fabricante del arrancador, se le puede elegir el método a emplear en una u otra aplicación mediante la parametrización de las variables que determinan el arranque. Este método más completo y sofisticado suele además aportar la información necesaria para que el operador pueda obtener diversa información del arranque y control del motor de la aplicación.

Pero suele ser más normal que estos equipos dispongan de una serie de elementos de fácil regulación, ya que al final los que se encargan de parametrizar y ajustar el equipos en cada una de las posibles aplicaciones suele ser técnicos de no muy alta cualificación, por lo que hay que facilitarle la tarea para que en todo momento puedan ellos mismos corregir casi a diario y optimizar la aplicación.

Bajo este último concepto la gran mayoría de arrancadores electrónicos industriales suelen llevar 3 o 4 potenciómetros (ver un ejemplo representativo en la figura 8), mediante los cuales se les puede dar información de la pendiente o requerimientos del arranque. Como se puede observar hay reguladores de límite



corriente, de tiempo de duración del arranque, y se puede observar que además suelen llevar un par de reguladores (potenciómetros) para ajustar la tensión tanto en el arranque como en una posible parada controlada. En este último tipo de control es muy poco usual, por lo que no se considera oportuno realizar un análisis de él.

Además se puede observar la derecha de la figura que aparecen unos pequeños interruptores (enumerados entre el 1 y el 8). Con ellos se les programa al arrancador las características más importantes del motor que se encuentra conectado al equipo, dado que puede conectarse varios motores más o menos similares, y en todo caso se debe de programar una identificación de la máquina eléctrica conectada.

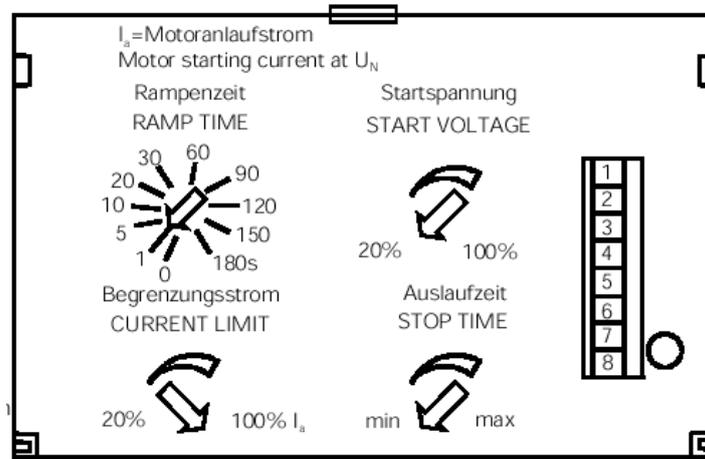


Figura 8. Elementos básicos de selección de tipo de arranque

#### 4.6 Otros utilidades de los arrancadores electrónicos

Por último, cabría añadir un par de cosas sobre este tipo de equipos que pueden servir como elementos de valor añadido al empleo de un arrancador electrónico. En primer lugar y dado que entre los elementos de toma de señal (valores de tensión y corriente) que necesariamente tiene que llevar incorporados este tipo de equipos, se les puede programar una serie de aplicaciones en servicio, por ejemplo la de protección de funcionamiento del conjunto arrancador-motor.

Es posible utilizar este equipos como vigilantes de la tensión y de la corriente y cuando, por cualquier motivo, se encuentre dichos valores fuera de los que se consideren apropiados se desconecta el disparo de los tiristores, o lo que es lo mismo se inhabilita y se desconecta el motor, produciéndose una parada pero evitando una posible avería por sobrecargas o tensiones inapropiadas.

Otra de las posibilidades que aporta este equipo es que al quedarse como elemento de control del motor durante todo el periodo de funcionamiento. Se puede dejar como vigilante y al detectar una sensible bajada de la corriente demandada (síntoma evidente de trabajar en vacío) se puede programar aviso de esta incidencia e incluso se pueda gestionar una bajada de tensión aplicada al motor de manera que se reduzca la potencia reactiva que se demanda de la red, mejorando el comportamiento energético del conjunto motor arrancador.



## 5 Cierre

Se puede concluir remarcando varias cosas dentro de este trabajo. Primero que dada la importancia que tiene la aplicación de este tipo de equipos electrónicos, y que rara vez se estudia conjuntamente la aplicación y el equipo (en cuanto a las etapas de potencia), puede y debe de servir este trabajo con un complemento muy interesante desde el punto de vista docente, ya que permite al alumno entender la utilidad de este tipo de equipos.

Al tratarse el trabajo de un desarrollo teórico-práctico de aplicación, evitando en lo posible el análisis matemático, que en muchos casos aparta al lector de una lectura clara y práctica, puede resultar llamativo para el alumno y por lo tanto cumplir con una parte docente interesante, que además acercan al lector al mundo real e industrial para el cual se está formando.

## 6 Bibliografía

### 6.1 Libros:

- [1] Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Pucho Panadero, R. "Aplicaciones Técnicas Industriales de Motores de Inducción". UPV. 2010.
- [2] Roger Folch, J., Riera Guasp, M., Roldán Porta, C. "Tecnología Eléctrica". Síntesis. 2010.
- [3] J.M. Merino Azcarraga. "Arranque Industrial de motores asíncronos", Mc Grau Hill. 1995.
- [4] Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Pucho Panadero, R. "Introducción a las Instalaciones y Tecnología Eléctrica". UPV. 2009.
- [5] Martínez Román, JA, Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M. "Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas". UPV. 2009.
- [6] Roger Folch, J., Riera Guasp, M., Pineda Sánchez, M., Pérez Cruz, J. "Prácticas de Laboratorio de Tecnología Eléctrica". UPV. 2011.

### 6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

- [7] Catálogos de arrancadores electrónicos. Ver páginas web de:

<https://www.automation.siemens.com/cd-static/material/info/e20001-a094-1300-x-7800.pdf>

<http://www.schneiderelectric.es/spain/es/productos-servicios/sistemas-instalacion-control/sistemas-instalacion-control-intermediate.page?f=NNM1%3AArrancadores+de+motor>

[http://www.ia.omron.com/product/family/980/index\\_fea.html](http://www.ia.omron.com/product/family/980/index_fea.html)