

Instalación de variadores electrónicos de velocidad

La gama de problemas derivados de la instalación de variadores electrónicos de velocidad para motores asíncronos admite asimismo diferentes soluciones tras hacer un estudio de la red

Eduardo Arcos Rabal

La reducción de precio de este tipo de equipos han hecho que sea cada vez más usual su presencia en las aplicaciones industriales o de edificios en las que se requiere una regulación más o menos precisa de la velocidad del proceso. Sin embargo el empleo indiscriminado de este tipo de equipos, sin un estudio previo (sobre todo en los de gran potencia), puede acarrear graves perturbaciones en la red eléctrica:

- 1) Funcionamiento de los dispositivos de regulación con problemas.
- 2) Disparo intempestivo de las protecciones diferenciales.
- 3) Disparo intempestivo de protecciones magnetotérmicas.
- 4) Elevadas caídas de tensión en el momento del arranque del convertidor.
- 5) Pérdidas adicionales y calentamientos más altos en las baterías de condensadores.
- 6) Provocar resonancia en equipos con condensadores.
- 7) Pérdidas adicionales en máquinas conectadas aguas arriba.
- 8) Incremento de ruido en transformadores y máquinas eléctricas rotativas.
- 9) Averías en los transformadores de distribución.
- 10) Generación de campos adicionales al principal en los motores eléctricos.
- 11) Efectos parásitos en sistemas de telecomunicaciones.
- 12) Efectos parásitos en máquinas que funcionan con telemando.
- 13) Efectos parásitos en el cableado de maniobra.

Todos estos fenómenos son debidos a las interferencias electromagnéticas que provoca el variador. Estas interferencias electromagnéticas se transmiten sobre dos medios:

- Interferencias electromagnéticas conducidas a través de la red. Son fundamentalmente los armónicos de intensidad.

- Interferencias electromagnéticas radiadas, que afectan a los equipos de comunicaciones.

Los diez primeros problemas del listado anterior se pueden considerar debidos a los armónicos de intensidad, ocurren aguas arriba del variador y son generados fundamentalmente por la etapa de entrada del mismo.

Los tres últimos puntos son generados fundamentalmente por la etapa de salida del variador, y son debidos a la emisión de ondas electromagnéticas en el cable que conecta el variador con el motor (hace de antena emisora) y la con-

mutación de los semiconductores de potencia de la etapa de salida.

En este artículo trataremos fundamentalmente de los armónicos de intensidad.

Diagrama de bloques de un variador electrónico de velocidad

Todos los posibles problemas generados en la instalación de un variador electrónico de velocidad vienen dados por la particular forma de trabajar de estos equipos reguladores. Tal y como se observa en la *figura 1*, un variador electrónico de velocidad, está compuesto por tres etapas:

1. Rectificador de entrada. Convierte la tensión de entrada de alterna senoidal en continua pulsatoria.

2. Regulador de tensión. Filtra la tensión pulsante proveniente del rectificador y la regula. El filtrado de la misma puede ser a través de un filtro de

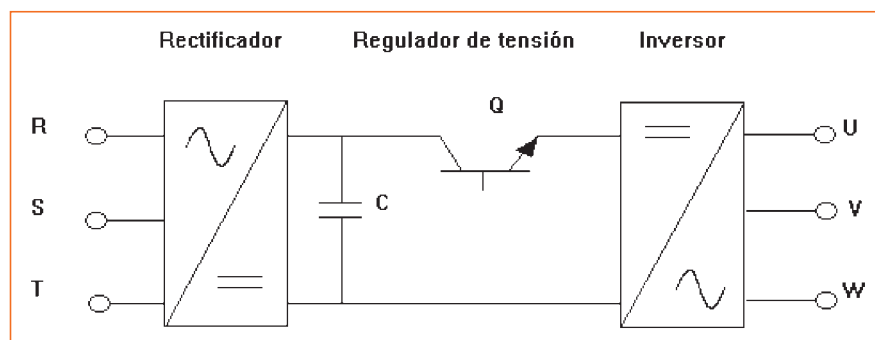


Figura 1.



corriente (bobina) tal y como se muestra en la *figura 1*, o de tensión (mediante un o varios condensadores).

3. Inversor. La tensión continua regulada proveniente de la etapa intermedia, se convierte en una onda alterna pulsante, generalmente mediante la técnica de modulación de la anchura de impulso (PWM).

Armónicos generados por el rectificador de entrada

Uno de los parámetros que definen un rectificador es su número de pulsos p . Este número de pulsos se define como el número de impulsos positivos de la onda

de salida que podemos contabilizar en un periodo de la onda de entrada (en el caso de la corriente de red 20 ms).

Las configuraciones más habituales de rectificadores, independientemente de si estos son controlados o no, son los de la *tabla 1*.

La expresión que nos da el orden de los armónicos generados por estos rectificadores es:

$$n = -Kp \pm 1$$

Donde:

n = orden de los armónicos generados

p = número de pulsos del rectificador

$K = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

De forma que para un rectificador de $p = 2$ pulsos, el orden de los armónicos generados será $n = 3, 5, 7, 11, \dots$ y para uno de $p = 6$ pulsos $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$

Tomemos como ejemplo el rectificador de la *figura 3* (la etapa de entrada de la mayoría de variadores comerciales, de pequeña y mediana potencia, responde a esta configuración tipo) cuyas características podrían ser las siguientes:

La composición de la onda de intensidad absorbida por este rectificador es la mencionada en la *tabla 2*.

Y la representación gráfica de esta

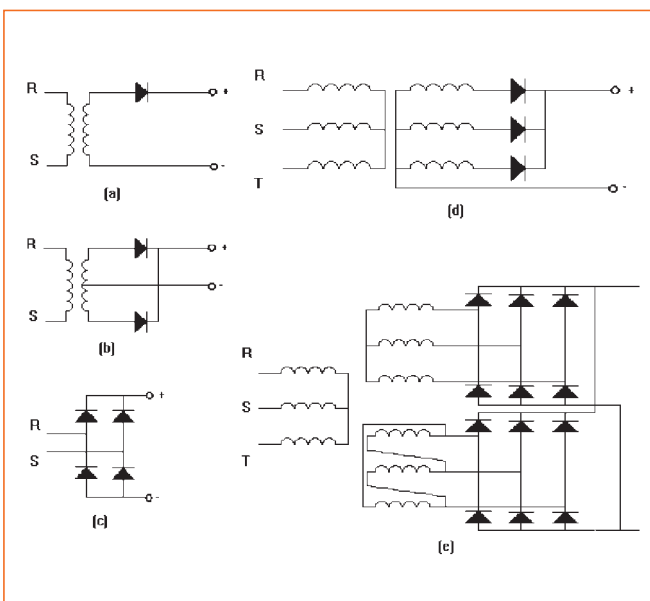


Figura 2.

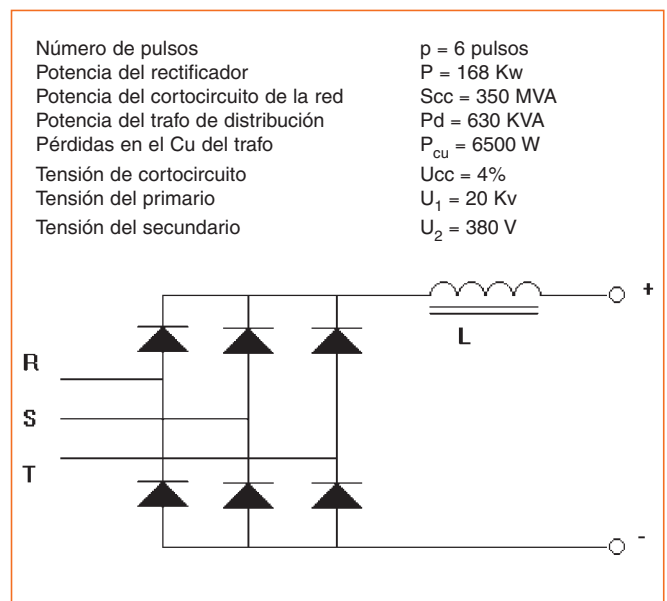


Figura 3.

RESUMEN

Cuando nos encontremos una instalación con síntomas de estar contaminada por armónicos, deberemos primero realizar un análisis de la misma siguiendo los siguientes pasos:

- Localizar las posibles fuentes de armónicos (Variadores, SAI, Rectificadores, etc.)
- Efectuar las mediciones de los armónicos. En principio cualquier parámetro sirve. En el artículo se han visto el análisis de Fourier y el THD. Estas mediciones se realizarán mediante un analizador de redes.
- Efectuar la simulación de la red. En el mercado existen diversos programas adecuados a tal efecto.
- Simular variaciones en los parámetros de la red, tales como Potencia de cortocircuito, cargas elevadas, bancos de condensadores, etc. Esto nos ayudará a determinar el comportamiento de nuestra red en diversas circunstancias. Una vez determinados todos estos puntos anteriores, procederemos a buscar la solución adecuada, siguiendo también los siguientes pasos:
 - Modificar la topología de la red.
 - Utilizar rectificadores de 12 pulsos. Ya que esto provocaría armónicos de orden 13 en adelante.
 - Desintonizar el circuito variando la potencia del banco de condensadores.
 - Utilización de filtros.
 - Inclusión de trafos de desfase.
 - Es recomendable la utilización de bancos de condensadores con tensiones superiores a las de la red.
 - Para que los filtros no se sobrecarguen por corrientes a la frecuencia de sintonización, es recomendable sintonizar el filtro ligeramente menor al armónico deseado.

onda distorsionada, viene dada por la *figura 4*. Siendo I_1 la onda equivalente sin distorsión, e I la onda real distorsionada.

Para valorar la cuantía de la distorsión armónica existen diversos parámetros, siendo uno de los más empleados la tasa de distorsión armónica (THD), tanto de tensión como de intensidad. La expresión general que nos proporciona el THD es:

$$THDI = \sqrt{\sum \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

$$THDV = \sqrt{\sum \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2}$$

Donde:

THDI = tasa de distorsión armónica de intensidad.

THDV = tasa de distorsión armónica de tensión.

I = intensidad del armónico fundamental (50 Hz).

I_n = intensidad del armónico n .

V = tensión del armónico fundamental (50 Hz).

V_n = tensión del armónico n .

Además de el THD, es importante conocer el orden de los armónicos generados por el convertidor, ya que el efecto de cada uno de ellos es muy diferente en el resto de la instalación. Debido al desfase de 0° , 120° y -120° , del sistema trifásico de corrientes, al multiplicar estos por el orden de cada armónico respectivo, salen sistemas de secuencia directa, inversa y homopolar, según se observa en la tabla adjunta (*tabla 3*):

El efecto de los armónicos de secuencia homopolar, como sólo se pueden cerrar por el neutro, es sobrecargar el mismo, debiendo prestar especial cuidado en su dimensionamiento en las redes donde estén presente este tipo de convertidores.

Los armónicos de secuencia directa crean pares parásitos inversos en los motores, provocando sobreesfuerzos y calentamientos.

Siguiendo el caso del rectificador de la *figura 2*, la onda de intensidad absorbida por éste tiene un THDI (%) = 28,5. Evidentemente cuanto más alto es el THDI más contaminada estará la intensidad absorbida por el convertidor.

Tipo de rectificador	Número de pulsos (p)	Figura
Monofásico de media onda	1	Figura 2 (a)
Bifásico de media onda	2	Figura 2 (b)
Trifásico de media onda	3	Figura 2 (d)
Bifásico de onda completa	2	Figura 2 (c)
Trifásico de onda completa	6	Figura 3
Exafásico con dos puentes	12	Figura 2 (e)

Tabla 1.

n orden	F (Hz) Frecuencia	I (A) Intensidad	% sobre el arm. Fundamental
1	50	243,1	100,0
5	250	48,6	20,0
7	350	34,7	14,3
11	550	22,1	9,1
13	650	18,7	7,7
17	850	14,3	5,9
19	950	12,8	5,3

Tabla 2.

Rango	Fund.	2	3	4	5	6	7
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	350
Secuencia	directa	inversa	Homopolar	Directa	Inversa	Homopolar	Directa

Tabla 3.

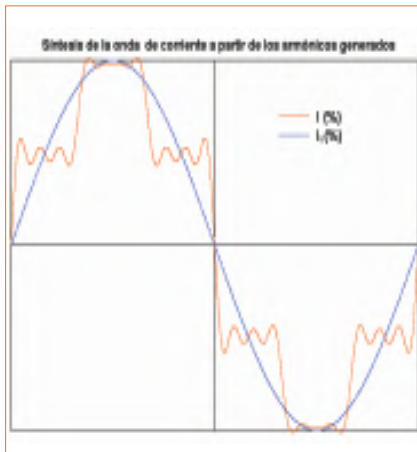


Figura 4.

Esta deformación en la onda de intensidad es la responsable de los problemas que puedan haber con los dispositivos colocados en serie, aguas arriba del variador. Pero, además, si la potencia de cortocircuito de la red no es lo suficientemente grande (es decir, su impedancia no es lo suficientemente pequeña), las intensidades armónicas provocarán caídas de tensión que deformarán la onda de tensión, lo que ocasionaría problemas con los dispositivos

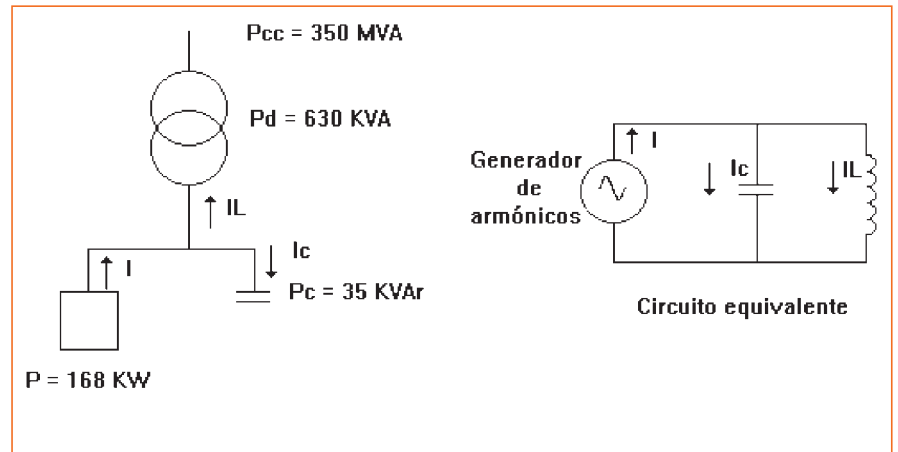


Figura 5.

colocados en paralelo con el variador. Esta distorsión en la onda de tensión es muy difícil de cuantificar, y en todo caso dependerá de la topología de la red. Como norma general, para evitar este tipo de problemas, alimentaremos el variador electrónico de velocidad empleando la menor longitud de cable y la mayor sección posible. Debemos también sobredimensionar el neutro para este tipo de instalaciones, por las razones anteriormente comentadas. Será conveniente

agrupar este tipo de cargas no lineales.

Si estas medidas no fuesen suficientes, provocando aun así problemas, tendríamos que acudir necesariamente a la instalación de un filtro.

Resonancia con los equipos de compensación de energía reactiva

Este problema también es típico de la instalación de estos equipos convertidores. El variador se comporta como una fuente generadora de armónicos, situán-

Rociadores Válvulas Accesorios Sistemas

La acreditada calidad de los productos Viking garantiza soluciones fiables y duraderas.

- Sistemas de tubería mojada, seca, de preacción, de diluvio, y el exclusivo Firecycle.
- Rociadores para aplicaciones industriales: ESFR montantes (únicos en el mercado), con ganchos, gota gota, Aquamiser, etc.
- Lo último en tecnología en sistemas de espuma.
- Válvulas y rociadores resistentes a la corrosión.
- Accesorios para montaje de tubería ranurada: Soportación, Ranuradoras.
- Y ahora nuevas válvulas de diluvio (E-1) y Control de Flujo (H-1) de 8"

VIKING®

Símbolo de calidad en todo el mundo

Viking es líder en la protección de la industria petroquímica

Productos y servicios de alta calidad a su alcance en cualquier lugar del mundo.

Para más información, póngase en contacto con su distribuidor más cercano, o llame a nuestro centro de servicio para España, Portugal y Latinoamérica.

C/ Mar Cantábrico, 10 - P. I. San Fernando, 1 - San Fernando de Henares,
E-28630 Madrid - España

Tel: +3491 677 83 52 - Fax: +3491 677 84 98

E-mail: serv_cliente@vikingcorp.com

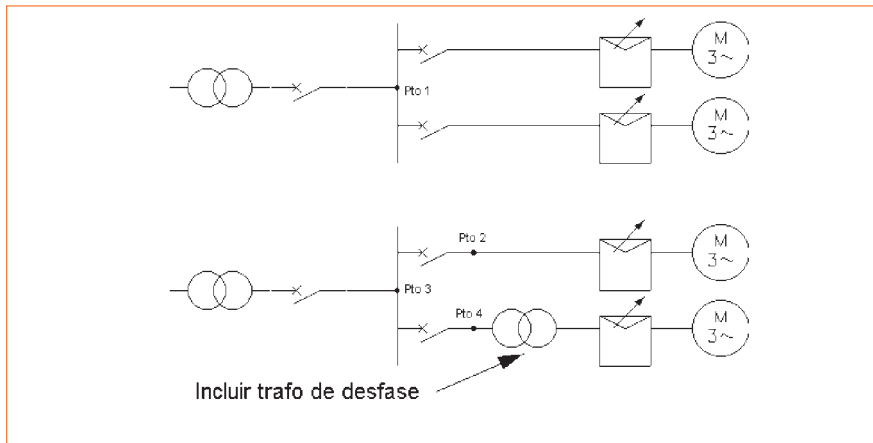


Figura 6.

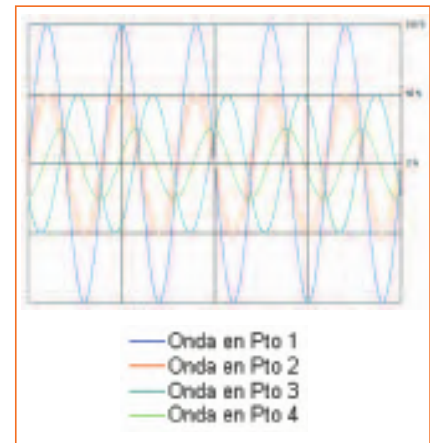


Figura 7.

dose en paralelo la red de alimentación y la batería de condensadores, tal y como se muestra en la *figura 5*.

Siguiendo con el ejemplo de la *figura 3*, consideraremos que tenemos conectado a la red una batería de condensadores $P_c = 35$ KVAR.

La frecuencia de resonancia vendrá dada por la expresión:

donde:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{cc}}{P_c}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{LC}}$$

f = frecuencia de resonancia en Hz

S_{cc} = potencia de cortocircuito de la red en KVA

P_c = potencia de la batería de condensadores en KVA

L = inductancia de la red en Henrios

C = Capacidad del banco de condensadores en Faradios

Como cálculo aproximado despreciaremos la impedancia de cortocircuito de la red de media tensión y de los cables de baja tensión al ser éstas muy pequeñas. Consideraremos por tanto, sólo la impedancia de cortocircuito del transformador. Según las normas CEL, podremos considerar:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}\% U^2}{100 S}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cu}}{3 I_N^2}$$

donde:

Z_{cc} = impedancia de cortocircuito del transformador en Ohms

R_{cc} = Resistencia de cortocircuito del transformador en Ohms

$U_{cc}\%$ = tensión de cortocircuito del transformador en %

U = tensión nominal del transformador en el secundario en V

S = potencia aparente del transformador en VA

P_{CU} = pérdidas en el cobre del transformador en W

I_N = intensidad nominal del transformador en el secundario en W.

y por tanto la reactancia de cortocircuito vendrá dada por: $X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$

La inductancia del transformador la obtendremos de: $L = \frac{X_{cc}}{\omega}$, donde X_{cc} es

la reactancia de cortocircuito del trafo y $\omega = 2\pi f$

Y la capacidad del banco de condensadores por: $C = \frac{P}{U^2 \omega}$, donde P es la

potencia del banco de condensadores, U es la tensión nominal y $\omega = 2\pi f$.

Sustituyendo los datos, obtenemos una frecuencia de resonancia de:

$$f = 1078 \text{ Hz.}$$

Si la impedancia de la red o la capacidad de los condensadores aumentasen, la frecuencia de resonancia disminuye.

Cambio de fase de la onda de entrada

Este método de reducción de armónicos requiere que se disponga de dos o más dispositivos generadores de armónicos. Si los dos dispositivos están conectados en el mismo punto, el efecto de los armónicos será aditivo, pero si mediante un transformador, conseguimos desfasar una de las ondas 180° , el efecto común de ambos dispositivos, será substractivo, minimizando o eliminando el problema, según se muestra en la *figura 6*.

Esta solución obliga a que los variadores de velocidad y los motores sean de una potencia parecida, y además que su ciclo de carga también sea parecido, obte-

niéndose la mayor eficacia cuando ambos son iguales. Otra solución practicable es intercalar el transformador en el variador de mayor potencia de la planta, y que sea éste el que compense a los más pequeños.

En la *figura 7* se observan las formas de onda del quinto armónico ($f = 250$ Hz) intercalando un transformador DY 5, según *figura 6*, que introduce un desfase entre primario y secundario de 150° . Como se puede apreciar, la disminución del valor máximo de la onda resultante en el punto 3 es de casi de un 75%. Además con este trafo se consigue el efecto adicional de eliminar los armónicos homopolares (múltiplos de tres), ya que estos no se pueden cerrar por el trafo.

Si el trafo incorporado hubiese sido un Dd6, (desfase = 180°) la onda resultante en el punto 3 se hubiese anulado (considerando motores y convertidores de igual potencia).

Con un transformador que aplique un desfase de 30° , se obtienen reducciones del THD de hasta un 60%.

Normativa aplicable

En España la única normativa aplicable son la norma UNE-EN 50160 "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución" además de UNE 21248/6-1996 donde se indica cómo realizar el cálculo del THD.

AUTOR

Eduardo Arcos Rabal

Ingeniero técnico industrial en la especialidad de electricidad por la Universidad Politécnica de Valencia. He ejercido su labor profesional siempre en el área del desarrollo de proyectos y la formación.