RYSEL

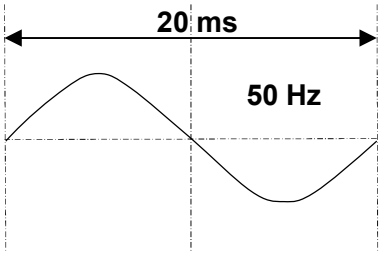
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

LA IMPORTANCIA DE LA FRECUENCIA
(DOCUMENTO TÉCNICO #1 V0.0 WEB 2025)

Este es el primero de lo que esperamos sea una larga serie de documentos técnicos que puede descargar exclusivamente desde nuestra nueva página web (www.rysel.es).

Cuando titulo “La importancia de la frecuencia” me refiero a la gran influencia que tiene la frecuencia en los fenómenos inesperados e indeseados que afectan a la industria como consecuencia de la masiva utilización de electrónica de potencia en conmutación.

1. LA FRECUENCIA Y LA ELECTROTECNIA TRADICIONAL: para los técnicos con formación clásica, hablar de frecuencia es hablar de 50 Hz (50 ciclos por segundo). La ley matemática que rige la tensión eléctrica que excita la circulación de corriente sigue una evolución senoidal con esa frecuencia indicada en la Unión Europea (hay otras zonas geográficas que trabajan a 60 Hz, como USA).



50 Hz= 50 ciclos/segundo
Período de la onda de 50 Hz = 1/50 s = 20 ms

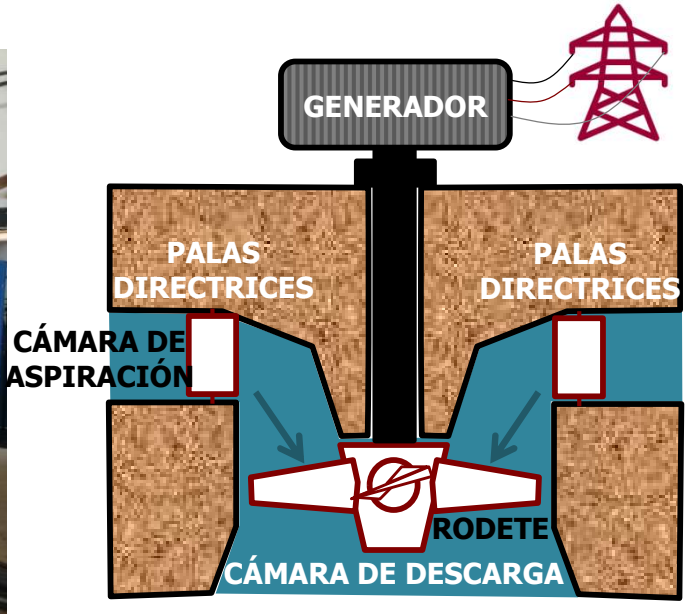
¿Y por qué 50/60 Hz y no otro valor?. Esto viene como consecuencia de la forma constructiva de las **máquinas eléctricas rotativas** (alternadores) que conformaron la red eléctrica general de los países y continentes.

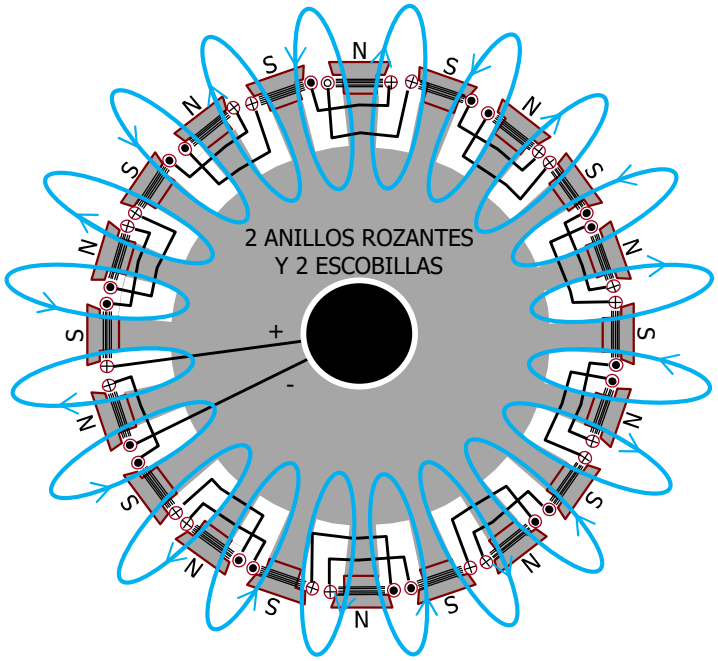
La frecuencia de salida dependerá de la velocidad de giro del alternador (y por ende, de la velocidad de la turbina hidráulica, de vapor o de gas que lo mueve).

ns(sincronismo)= 60*f/p (si f=50 Hz en Europa)

(p es el número de pares de polos de la máquina, por ejemplo, p=2 ns=500 rpm, p=10 ns=300 rpm, p=40 ns= 75 rpm)

Interesará que la velocidad de la máquina (y entonces de la turbina que la acciona) no sea muy grande para no someter al rótor a unas fuerzas inerciales extremas. Incluso dependiendo de la velocidad de accionamiento la forma constructiva de la máquina es distinta. Los primeros alternadores utilizables fueron los que fijaron la frecuencia de red. Una vez que se fijó la frecuencia de la red, todas las plantas generadoras conectadas deben sincronizarse con esa frecuencia (se dice que la red “impone la frecuencia de trabajo”.



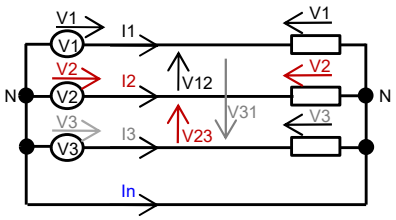


IDEA ESQUEMÁTICA DE UNA EXCITACIÓN EN EL RÓTOR CON POLOS SALIENTES 2P=20 (ns=**300 rpm** para 50 Hz de generación)

Si desea profundizar en los detalles de los alternadores y otros tipos de generadores, puede buscar publicaciones al respecto en el LinkedIN de RYSEL SAT.

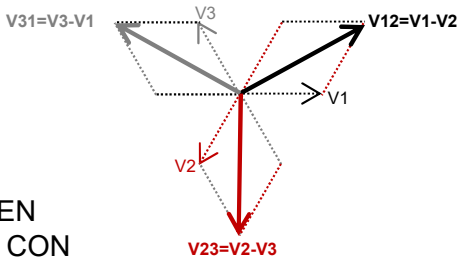
Cualquier alternador podrá girar a su velocidad de sincronismo (por ejemplo, el del dibujo son 300 rpm) siempre que su construcción eléctrica genere un sistema de tensiones trifásicas de 50 Hz.

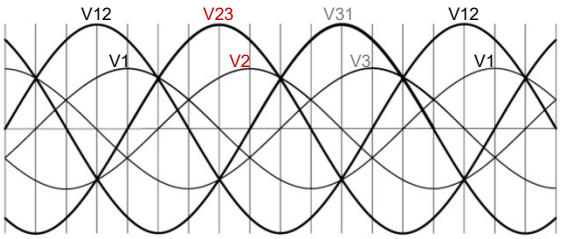
Todos los generadores se conectan a la red eléctrica de distribución en AT (para que las secciones de los cables sean pequeñas) y a medida que nos vamos acercando a los consumidores se van realizando descensos de tensión hasta llegar al transformador final en la fábrica o en la calle, con salida trifásica en BT a 690/500/400 V (industria y distribución general). En este ejemplo se ve una etapa de alimentación trifásica industrial en el final del escalón.



GENERADOR O SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR

CARGA EN ESTRELLA CON NEUTRO





En esa conexión, las corrientes de línea y las de fase coinciden y las tensiones de línea son √3 veces las de fase y están retrasadas 30º eléctricos con respecto a aquellas. Si la carga es equilibrada, la corriente de neutro es nula. Si no es equilibrada, la suma instantánea de las tres corrientes más la del neutro es nula. Dependiendo de la naturaleza de la carga, el desfase de la corriente con respecto a la tensión será uno u otro. Sea como fuere, todas las formas de onda de tensión y corriente tengan desfase o no, tienen una frecuencia de 50 Hz.

Entonces, trabajamos con valores que siguen una ley senoidal alternativamente positivos y negativos. ¡Vaya lío!. La corriente alterna se impuso a la CC en lo que a distribución se refiere por sus menores pérdidas y caídas de tensión, permitiendo grandes distancias entre los puntos de generación y consumo.

Pero entonces ¿Por qué me hablan de 400/220 V si el valor es variable?. Bueno, ha topado Ud con el concepto de "valor eficaz" de la tensión o de la corriente senoidal. El valor eficaz de una forma de onda en un intervalo es el **valor cuadrático medio de esa onda en ese intervalo** (valor estadístico).

PARA UNA ONDA CONTÍNUA EN UN INTERVALO (x1, x2) $y= f(x)$ $F=\sqrt{[1/(x2-x1) * \int f^2(x)dx]}$

Si "y" fuera una corriente alterna y "x" el tiempo, este valor correspondería a la definición de una corriente continua que generaría la misma disipación de calor que aquella sobre una resistencia en ese intervalo de tiempo.

En el caso de una alterna senoidal, la relación entre el valor máximo y el eficaz es de √2 (por ejemplo, si el valor eficaz de la tensión alterna del enchufe de casa son 220 V, eso quiere decir que la ley senoidal de tensión alterna es de $220*\sqrt{2}*sen(2*\pi*50*t)$. Para otras formas de onda distintas de la senoidal, esta relación será otra (¿Le suena la etiqueta "TRMS" en los polímetros modernos?. Esos valen para cualquier forma de onda y no solo la senoidal).

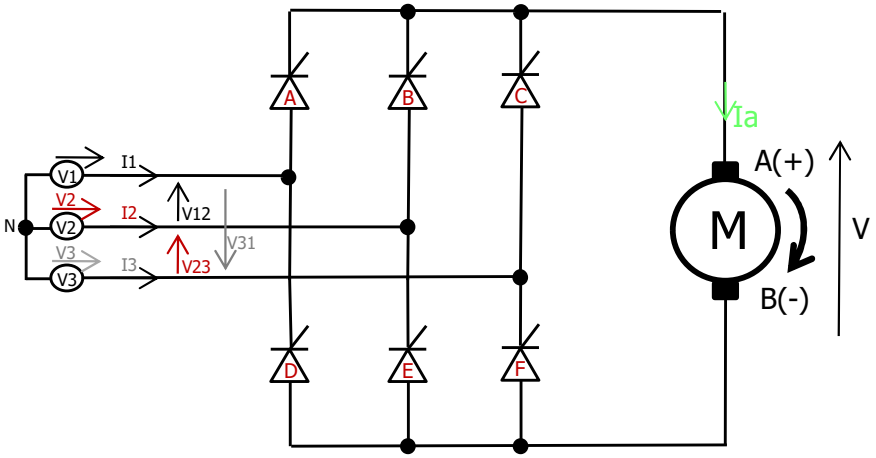
Normalmente hablamos de valores eficaces porque la corriente continua es más fácil de entender, pero desde un punto de vista estricto en electrotecnia se trabaja con vectores (a veces llamados fasores) que caracterizan la variable con un módulo y un desfase. Pero esto es materia para otro documento técnico futuro. Centrémonos en lo que nos ocupa. La frecuencia desde el punto de vista clásico no cambia. Todas las magnitudes eléctricas implicadas "bailan al ritmo de 50 ciclos por segundo".

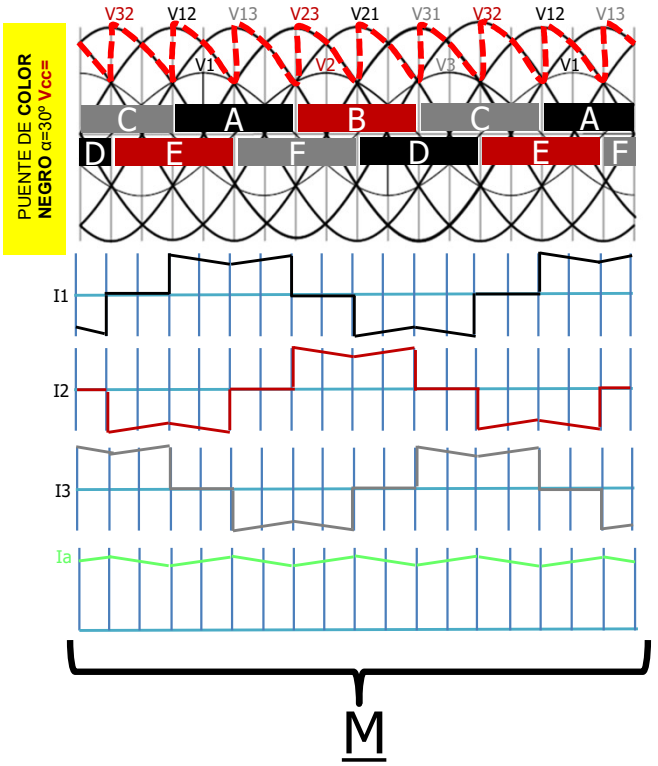
Toda la teoría matemática y desarrollo industrial asociado se basaba en la estabilidad y constancia de la frecuencia de todas las señales eléctricas implicadas. ¿A que ya se va viendo el problema…?

2. LA FRECUENCIA Y LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA: las primeras cargas alineales (por si acaso, recordarles que una carga alineal es aquella que alimentada con una tensión senoidal consume una corriente no senoidal) comenzaron a aparecer generadas por conmutadores mecánicos, válvulas de vacío y sobre todo con la llegada de los semiconductores trabajando en conmutación.

Este tipo de montajes no sólo provocaban consumos alineales, sino que pudiera suceder que a pesar de tener la frecuencia impuesta por la red a la entrada (50 Hz) se trabajara con frecuencias diferentes en la etapa intermedia o de salida de estos equipos. Formas de onda de todo tipo (rectangulares, triangulares, en diente de sierra, formas de onda compuestas o senoidales troceadas, etc…).

Además, en muchas ocasiones las velocidades a las que estos equipos conmutaban la circulación de corriente eran altísimas.





VARIADOR DE VELOCIDAD A TIRISTORES PARA MOTOR DE CC. SE LE ALIMENTA CON TENSIÓN TRIFÁSICA Y CONSUME CORRIENTE ALINEAL, ENTREGANDO A LA SALIDA UNA TENSIÓN CONTINUA (EN ROJO) DE VALOR VARIABLE SEGÚN LA VELOCIDAD QUE DESEEMOS CONSEGUIR EN EL MOTOR. SE MUESTRA PARA UN VALOR DE VELOCIDAD DETERMINADO.

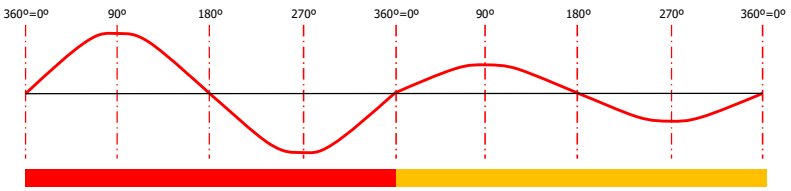
Vale, es un consumo alineal ¿pero por lo menos, las formas de onda del consumo de corriente de red (I1, I2, I3) parecen seguir teniendo una frecuencia de 50 Hz no?. Pues en ese caso si, efectivamente. Y la frecuencia a la salida es 0 (porque estamos alimentando a un motor de corriente continua… Pero al tratarse de formas de onda alineales, la electrotecnia clásica las tolera mal. Por ejemplo, el valor eficaz de las corrientes alternas consumidas de la línea YA NO VA A MANTENER LA RELACIÓN DE √2 CON EL VALOR MÁXIMO DE LA FORMA DE ONDA. UN POLÍMETRO CLÁSICO VA A MEDIR MAL. Ya sabemos como el estudio matemático de estos consumos alineales implica también a la frecuencia porque se usa la transformada en serie de Fourier, con términos de f creciente…

Pero volvamos al tema que nos ocupa. Un variador de velocidad electrónico va a generar una salida a motor basada en una modulación de la tensión intermedia (**revise publicaciones al respecto de RYSEL SAT**).

Para cada referencia de velocidad se generan dos señales de control (**baja potencia**) para la multiplicación:

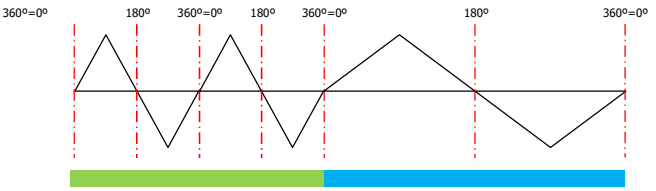
- **MODULADORA DE AMPLITUD**: está relacionada con el valor eficaz de la salida. Es senoidal, tiene amplitud variable y frecuencia constante.
- **PORTADORA DE FRECUENCIA**: está relacionada con la frecuencia de salida. Es triangular y tiene amplitud constante y frecuencia variable.

Desde el inicio de la electrónica con semiconductores, las formas de onda sinusoidales, rectangulares y triangulares **de baja potencia** eran generadas fácilmente (primero con transistores, condensadores y bobinas y luego con amplificadores operacionales).



UN OBJETIVO DE AMPLITUD

UN OBJETIVO DE AMPLITUD MENOR



UN OBJETIVO DE FRECUENCIA

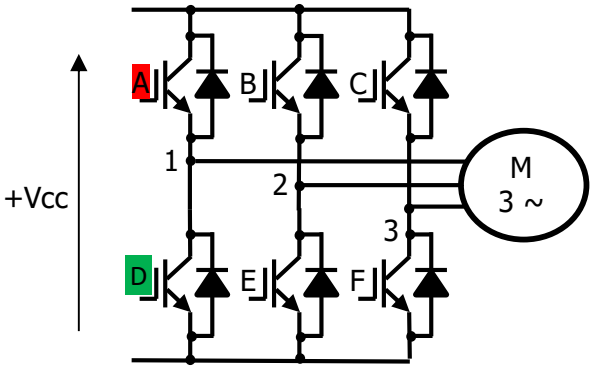
UN OBJETIVO DE FRECUENCIA MENOR

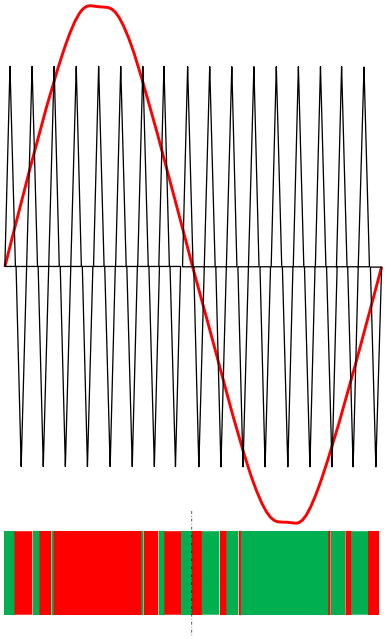
Para una referencia de velocidad estática en un momento dado (esto es, para una salida tensión/frecuencia requerida), el variador sabe la amplitud de la moduladora y la frecuencia de la portadora que tiene que generar. Genera ambas y hace la multiplicación.

Para la primera de las tensiones de fase simple (las otras dos irían desfasadas 120 grados eléctricos para formar un sistema trifásico, sería como sigue:

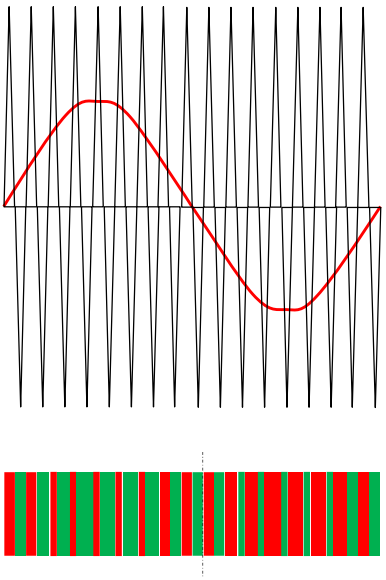
MODULACIÓN= PRODUCTO=COMPARACIÓN

FASE 1 MODULADORA>PORTADORA CONDUCE A
MODULADORA<PORTADORA CONDUCE D

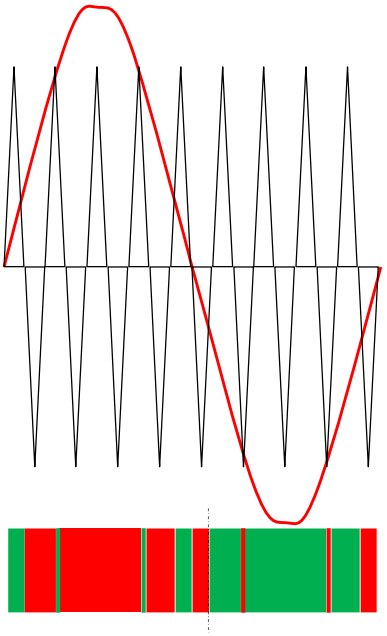




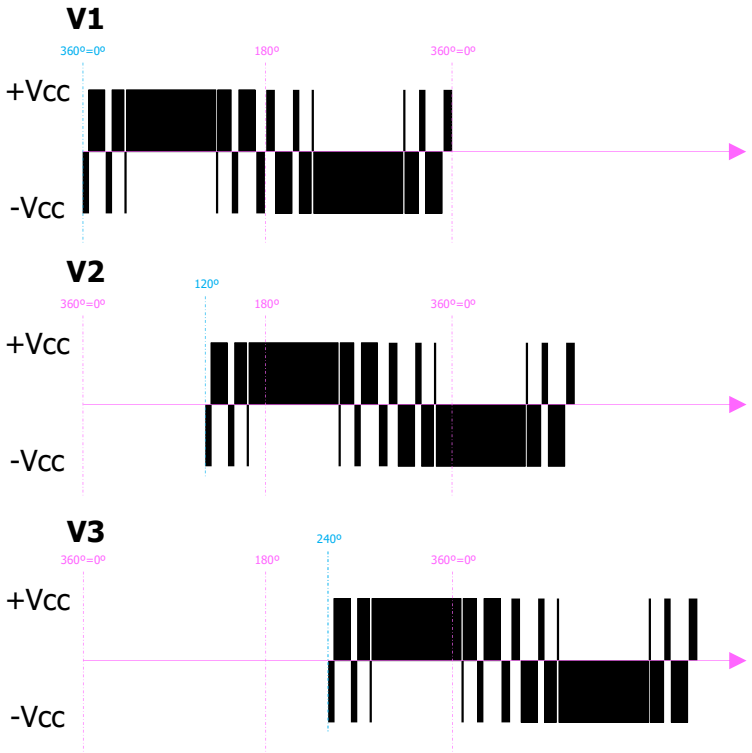
UN EJEMPLO GENÉRICO



UN OBJETIVO DE AMPLITUD MENOR



UN OBJETIVO DE FRECUENCIA MENOR



Cada vez que el variador incrementa o decrementa la velocidad de motor, se genera un nuevo juego de formas de ondas de control y la situación cambia dinámicamente.

Por tanto, las gráficas que observa son para un instante en régimen permanente a una velocidad concreta.

La cantidad de corriente del variador es demandada por la carga girando a cada velocidad (lea mi publicación previa al respecto).

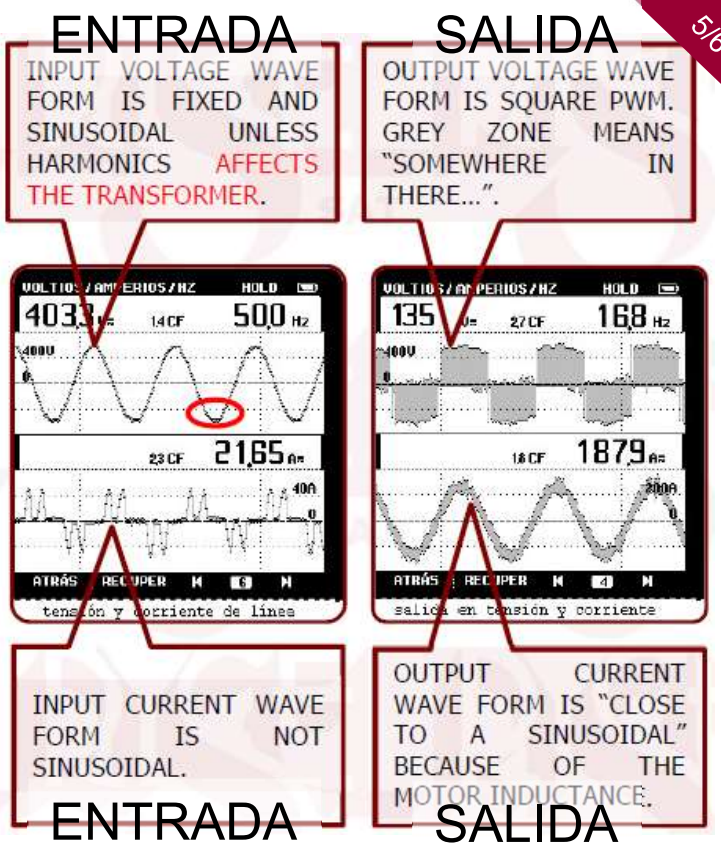
No es fácil dibujar las tensiones compuestas, pero uno puede hacerse a la idea de que la onda será similar a la de la tensión simple, un pulso rectangular con ciclo variable.

Para un objetivo de menor amplitud el ciclo desciende y viceversa. Para un objetivo de menor frecuencia, la onda se estira y viceversa.

Las tensiones son ondas cuadradas pero las corrientes no están tan mal por la inductancia intrínseca del motor. La inductancia no permite a la corriente variar rápidamente.
En las imágenes de la derecha puede ver una tensión compuesta y la corriente de una fase a la entrada y a la salida de un variador.

¡Luego se trabaja con una modulación (producto) de señales de control que generan salidas de tensión modulada en ancho de pulso con una resolución de **KHz**!. Estas etapas intermedias van a generar ruido eléctrico.

Las imágenes de la derecha están tomadas con un scopemeter FLUKE 95 a la salida de un variador de velocidad. Cuando un equipo de medida "dibuja una zona gris" es que la forma de onda es muy rápida y no es capaz a dibujarla en tiempo real, indicando que "está más o menos por ahí".



Con las fuentes de alimentación modernas (se las denomina "fuentes conmutadas", ya no haría falta explicar más), con las UPS, los balastos electrónicos de las lámparas LED, etc sucede otro tanto.

Entonces empezamos a tener frecuencias de KHz en el interior de los equipos industriales modernos (y variables en la salida de alguno de ellos como por ejemplo un variador de velocidad electrónico, también llamado "convertidor de frecuencia".

Vale, entonces, ¿Qué pasa cuando la frecuencia es alta y/o varía muy bruscamente?. Pues muchas cosas y ninguna buena… A ver cuántas enumero, seguro que se me olvidan varias…

- Los acoplamientos inductivos y capacitivos dependen de la frecuencia (entre otras cosas).
- La impedancia de las bobinas sube y la de los condensadores baja si se aumenta la frecuencia y viceversa. Los fenómenos de resonancias pueden aparecer de forma no deseada cuando nos alejamos de los 50 Hz.
- Las cargas eléctricas en movimiento (y si la frecuencia es alta la dQ/dt también lo será) influyen en la generación de dos campos acoplados (eléctrico y magnético) que fluctúan simultáneamente en planos perpendiculares generando lo que llamamos un campo electrómagnético en la zona del espacio donde no están las cargas. Este campo inducirá corrientes (también de alta frecuencia) en aquellos conductores que se encuentren en su zona de influencia y posicionados de la forma adecuada. Cuanto mayor sea la frecuencia asociada a este campo, peores consecuencias tendremos (a más frecuencia menos longitud de onda y por ejemplo, les sonará lo energéticas que pueden ser las microondas en comparación con otras ondas de mayor longitud… ¡¡¡de hecho las usamos para excitar las moléculas de agua y calentarnos la comida!!!).
- El comportamiento de los conductores varía para las corrientes de alta frecuencia, tendiendo a circular estas por la superficie libre del mismo en lugar de aprovechar toda la sección (efecto SKIN). Este efecto es especialmente importante y beneficioso para las pantallas electrostáticas, pero no para otras aplicaciones, como por ejemplo en los relés térmicos basados en bimetales o incluso, para los conductores propiamente dichos, pues reduce su sección útil y genera calentamientos no deseados.
- La calidad de los apantallamientos se ve influenciada por la capacidad del metal de la pantalla para deslocalizar cargas rápidamente en su superficie, haciéndolas moverse desde la tierra con la suficiente velocidad como para anular las líneas del campo eléctrico "agresor". Si la agresión es de mayor frecuencia, esta capacidad puede verse mermada para un determinado material y temperatura, dejando pasar líneas de campo y, por tanto, perdiendo capacidad de apantallamiento.
- Y como comentaba anteriormente, los consumos alineales se estudian matemáticamente desde su equivalente armónico. Una forma de onda muy distorsionada tendrá un espectro armónico "mas complicado" que una con una leve distorsión. Habitualmente no se incluyen los armónicos dentro de las perturbaciones de AF por lo mencionado, aportan muy poco al estudio los armónicos superiores porque tienen una amplitud muy pequeña y normalmente los despreciamos.

¿Se me olvida algo?. Coméntelo en la sección correspondiente y lo incluiré en posteriores versiones.

Imagine ahora como todas estas componentes de alta frecuencia interactúan (se suman y restan) en los diferentes circuitos que componen la instalación (conductores, red de tierras) y además hay interacciones sin contacto en la zona espacial "que rodea a los aparatos electrónicos…".

Por lo tanto, las frecuencias por encima de 50 Hz nos sacan a los ingenieros industriales de nuestra zona de confort, haciendo aparecer todo tipo de fenómenos no deseados…

Y aquí decimos lo de siempre. Para saber a lo que nos tenemos que enfrentar tenemos que medir y caracterizar el problema para saber a lo que nos enfrentamos…

- Los consumos alineales se deben estudiar calculando su equivalente en serie armónica que ya ha visto que generalmente no podríamos decir que se trata de fenómenos de AF aunque estén por encima de los 50 Hz ya que los armónicos van teniendo muy poca amplitud a medida que sube la frecuencia y aportan muy poco.
- Los fenómenos de compatibilidad electromagnética conducida y radiada sí que podríamos incluir dentro del espectro de la AF.

Eso nos obliga a adentrarnos en terrenos pantanosos para nosotros, que podríamos decir que pertenecen al mundo de los ingenieros de telecomunicaciones.

Nosotros no solemos usar montajes de laboratorio porque nos enfrentamos a instalaciones industriales existentes. Por ello tenemos que buscar un compromiso que nos permita solventar nuestro día a día. Este compromiso pasa por ser un poco menos exigentes con el ancho de banda (= margen de frecuencias estudiadas) que nuestros equipos de medida pueden manejar, generalmente porque las tensiones y sobre todo, las corrientes con las que tratamos en campo son mayores de las que se manejan en los laboratorios de compatibilidad CEM.

Todos estos problemas se han de medir.

En RYSEL Automatización y Control llevamos desde 1986 dedicados a la electrónica de control y de potencia en el mundo industrial. Hemos atesorado conocimiento y equipamiento desde entonces.

¿LO HA LEÍDO?. ¡DESDE 1986!.

Somos conocedores de los consumos alineales y de los fenómenos de compatibilidad EM porque nos hemos dedicado a esto desde los primeros pasos de la electrónica de potencia industrial en España (es decir, a los equipos que han contribuido a crear los problemas con los que nos enfrentamos ahora que se ha generalizado su uso).

TENEMOS EXPERIENCIA PROPIA. NO COPIAMOS A NADIE.

Estamos ubicados en Gijón (Principado De Asturias) pero debido a nuestra actividad en RYSEL SAT como subcontrata de ABB, estamos casi siempre fuera de Asturias por lo que es fácil que estemos más cerca de Ud. de lo que pueda pensar.

Si desea contactar conmigo (Jose Carlos Álvarez Alonso) para hablar sobre su necesidad puede hacerlo en el 659 488 836 o enviándome un email a jcalvarez@rysel.es (insista o déjeme un mensaje si no le respondo porque a veces me pilla Ud. en obra y es difícil o imposible contestar al teléfono). **Somos gente de trabajos en trinchera, al pie del cañón y de vender con conocimiento de causa.**

Próximamente entrará en servicio nuestra nueva página web, con contenido técnico exclusivo para descargar. Esté al tanto de nuestras publicaciones en redes al respecto.

www.rysel.es info@rysel.es 985 355 781