

MODULO N°14

INVERSORES

UNIDAD: CONVERTIDORES CC - CA

TEMAS:

- Convertidores CC – CA.
- Conceptos Básicos del Transformador.
- Inversor Monofásico Push – Pull.
- Inversor Monofásico en Puente.
- Inversor Trifásico en Puente.
- Técnicas de Modulación.

OBJETIVOS:

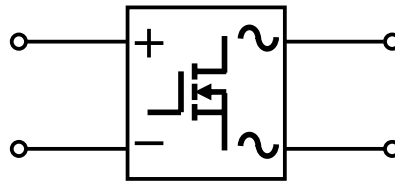
- Entender las características principales de los transformadores para inversores.
- Explicar la operación de los inversores monofásicos.
- Explicar la operación de los inversores trifásicos.
- Comprender las características de las diferentes técnicas de modulación.

DESARROLLO DE TEMAS

1. Convertidores CC – CA:

Los convertidores CC – CA, también reciben el nombre de **Inversores (Inverters)**. La función de estos circuitos, como su nombre lo indica, es generar una señal de corriente alterna, generalmente senoidal, a base de una fuente de corriente continua (ej. baterías, convertidor CA – CC, convertidor CC – CC, etc.).

A continuación se muestra un diagrama de bloques de este circuito (el símbolo de MOSFET puede ser reemplazado por otro elemento, se usa debido a su popularidad en estas aplicaciones):



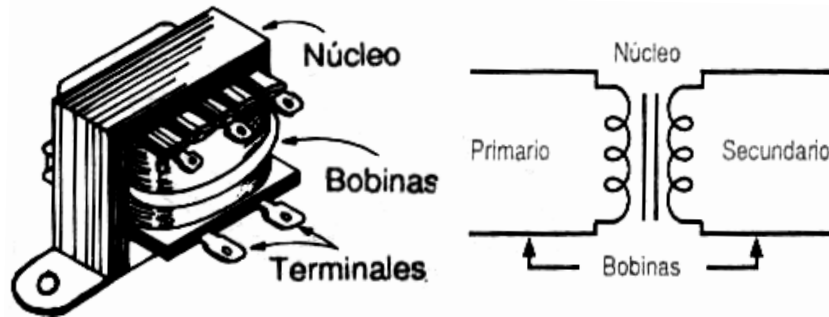
A pesar de que los inversores pueden funcionar independientemente, es común encontrarlos como parte de sistemas complejos tales como UPS's, variadores de velocidad de motores de inducción, soldadoras electrónicas, etc., en donde trabajan en conjunto con los convertidores antes estudiados.

Debido a que en los inversores, es común el uso de transformadores de alto rendimiento, para obtener altos voltajes de corriente alterna, se presenta a continuación un breve resumen de las características principales de estos dispositivos.

2. Conceptos Básicos del Transformador:

Un transformador es un dispositivo que recibe en su entrada una señal de voltaje variable y genera en su salida una señal de iguales características pero de mayor o menor amplitud.

A continuación se observa la apariencia física de este dispositivo junto con su símbolo esquemático y la descripción de sus partes principales:



- **Bobinado Primario:** Aquí se conecta la tensión que se va transformar.
- **Bobinado Secundario:** Aquí se recibe la tensión transformada.
- **Núcleo:** Actúa como una estructura sólida para enrollar las bobinas a la vez que permite la circulación de flujo magnético, responsable de transformar las señales de voltaje.

En teoría, un transformador presenta las siguientes relaciones entre voltajes, intensidades, número de espiras y potencias del primario y secundario:

$$P_p = P_s$$

$$V_p / V_s = N_p / N_s = I_s / I_p$$

Sin embargo en la práctica, estas relaciones no se cumplen exactamente debido a pérdidas de potencia producidas por efectos tales como: saturación magnética del núcleo, corrientes de Eddy, efecto Joule, ciclo de histéresis, etc., las cuales pueden ser despreciadas bajo ciertos rangos de operación, pero si se exceden dichos límites, las pérdidas de potencia pueden llegar a distorsionar por completo el funcionamiento del transformador.

En general, los transformadores de alto rendimiento como los usados en los inversores, se caracterizan por disminuir estas pérdidas al mínimo, sobre un rango de operación mucho mayor que el de los transformadores normales.

Para lograr esto, estos transformadores presentan dos modificaciones importantes: **núcleos de alta calidad** y **frecuencias de operación elevadas**. Para entender esto es necesario observar las siguientes relaciones básicas de fabricación de los transformadores:

$$S_n \approx K_1 * P_p / Q$$

$$N_p \approx K_2 * V_p / f \quad N_s \approx K_2 * V_s / f$$

Donde:

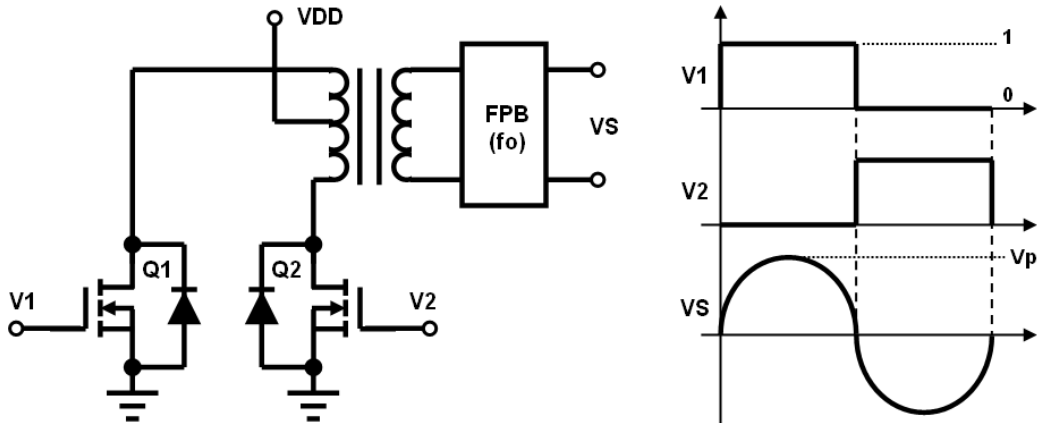
- **S_n:** Sección neta de la columna donde se enrollan las bobinas.
- **Q:** Calidad del material ferromagnético con el que se construye el núcleo.
- **f:** Frecuencia de la señal variable que ingresa al transformador.
- **K₁, K₂:** Constantes del Transformador no susceptibles a cambio.

De acuerdo a lo anterior un transformador fabricado con un material magnético de alta calidad tiende a ser más pequeño. Generalmente estos transformadores utilizan **Ferrita como material base, en reemplazo del hierro silicio**.

Adicionalmente, el número de espiras de cada bobinado depende del voltaje requerido y de la frecuencia de operación, mientras mayor la frecuencia menor el número de espiras requeridas para un mismo voltaje. Los transformadores de alto rendimiento operan con frecuencias que van desde unos pocos KHz hasta los varios MHz, en reemplazo de las frecuencias de 50Hz y 60Hz.

3. Inversor Monofásico Push Pull:

Este tipo de inversor es muy popular para la gama de bajas potencias (hasta 500W), debido a que solo requiere dos transistores para su funcionamiento, también se lo puede encontrar bajo el nombre de **Inversor a Toma Central**, debido al uso de un transformador con una derivación central, lo que permite obtener voltajes simétricos pero desfasados 180°, con respecto a la toma central. A continuación se presenta su esquema y las formas de onda respectivas:



Para lograr la generación de una señal alterna en el secundario del transformador, es necesario invertir constantemente el sentido de la corriente que atraviesa el primario, mientras que la frecuencia de salida dependerá de la frecuencia de esta inversión. En este caso cuando Q1 funciona, la corriente fluye desde el terminal positivo (VDD) hacia el extremo superior del primario, hasta alcanzar el terminal negativo. Por otra parte cuando Q2 funciona, la corriente fluye desde el terminal positivo (VDD) hacia el extremo inferior del primario, hasta alcanzar el terminal negativo.

Este proceso genera una señal alterna, altamente irregular en el secundario, por lo que es necesario utilizar un filtro pasabajo con frecuencia de corte igual a la frecuencia deseada en la salida (ej: $f_o = 60\text{Hz}$), a fin de suprimir el resto de armónicos producidos y tener una señal senoidal pura.

Matemáticamente, el voltaje de salida se puede calcular utilizando las siguientes expresiones:

$$V_{ef} = 0.45 * VDD * a$$

$$V_p = 1.414 * V_{ef}$$

Donde:

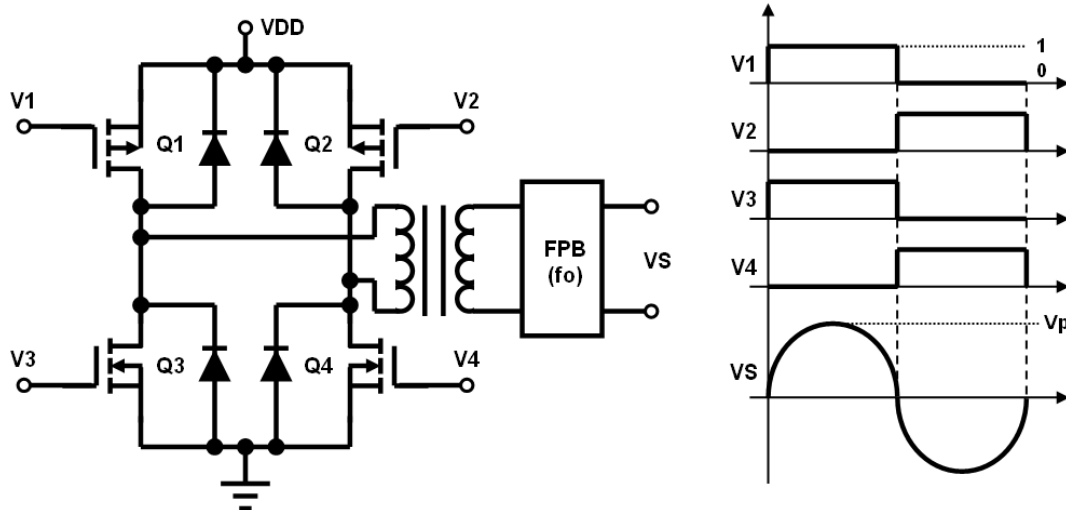
- **a**: Representa la relación entre el voltaje del primario y del secundario.
- **VDD**: Es la magnitud de la fuente de corriente continua (ej. 12V para vehículos).

Si bien este sistema es de fácil implementación, presenta 2 inconvenientes graves:

- El voltaje de eficaz de salida representa menos del 50% del voltaje de la fuente de alimentación, lo que se traduce en que la relación de transformación sea el doble de lo necesario, es decir, se requiere más número de espiras y por ende mayor costo.
- Este sistema no puede operar sin transformador, debido a que requiere la toma central como punto de referencia para realizar la inversión, lo cual reduce el número de aplicaciones posibles.

4. Inversor Monofásico en Puente:

Este inversor es ampliamente usado para la gama de aplicaciones de mediana potencia (hasta 10KW), y en general para todas aquellas que no requieran transformador. A continuación se presenta su esquema y las formas de onda respectivas:



Como se puede observar, este sistema es igual al de un propulsor de CC en puente, la diferencia radica, en que este sistema esta diseñado para realizar constantemente una inversión de polaridad (giro en el caso de motores CC) a intervalos iguales, que finalmente determinarán la frecuencia de salida. De igual manera que en el inversor push pull, es necesario el uso de un filtro para obtener una señal senoidal libre de armónicos.

Matemáticamente, el voltaje de salida se puede calcular utilizando las siguientes expresiones:

$$V_{ef} = 0.9 * VDD * a$$

$$V_p = 1.414 * V_{ef}$$

Las características de este inversor son:

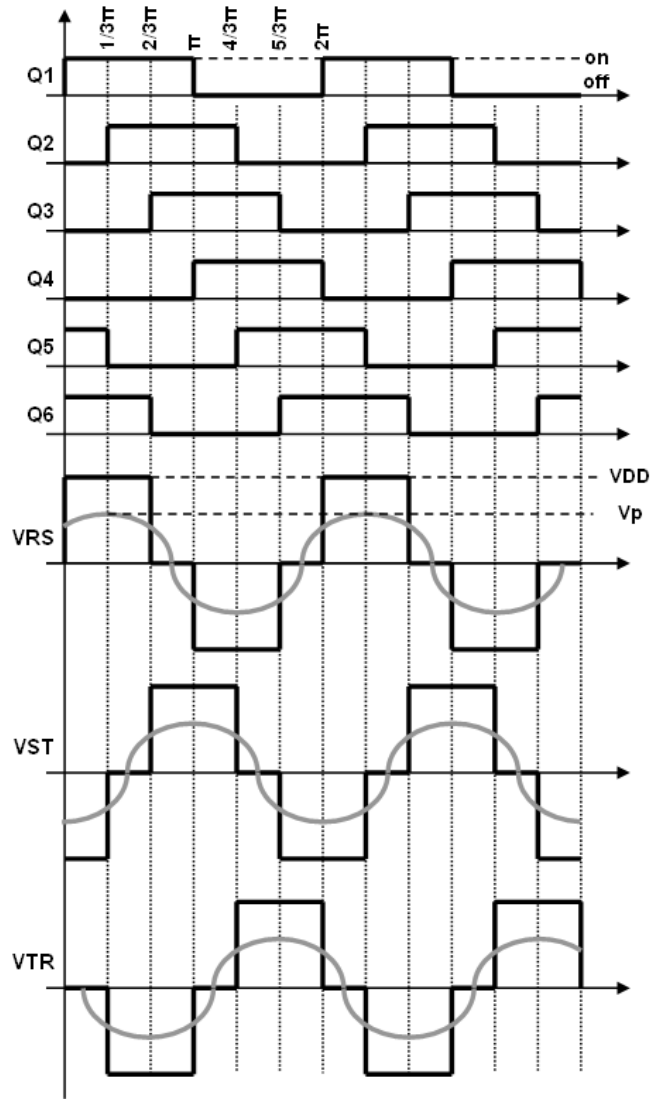
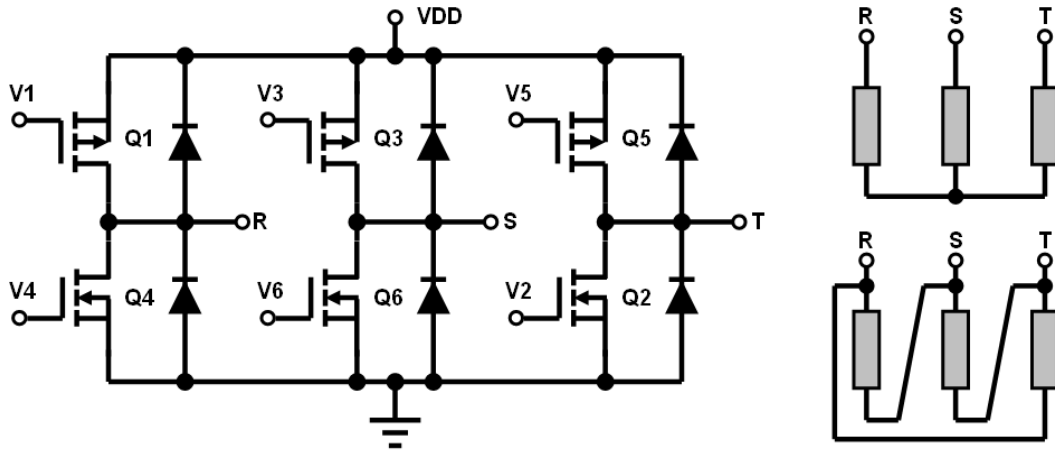
- El voltaje eficaz de salida representa el 90% del voltaje de la fuente de alimentación, lo que disminuye los costos del transformador.
- El uso de un transformador, no es obligatorio excepto en aquellas aplicaciones que requieran aumento o disminución de voltaje (ej: inversores para vehículos).
- El uso de 4 transistores complica el diseño del sistema de control, aumentando el costo del mismo.

5. Inversor Trifásico en Puente:

Para la gama de aplicaciones de alta potencia (hasta 100KW), es común el uso de inversores trifásicos. Uno de estos sistemas se muestra en la siguiente página junto con sus respectivas formas de onda.

Básicamente, se trata de 3 inversores monofásicos en puente combinados en un solo sistema que usa 6 transistores, la numeración de los cuales esta de acorde a la secuencia de activación de los mismos.

Además se puede observar, los modos de conexión que se puede aplicar a la carga trifásica, misma que puede ser desde un transformador de distribución hasta un motor de inducción, estos modos son: conexión Y o estrella (superior) y conexión Δ o triángulo (inferior).



Como se observa, las secuencias de activación de los 3 primeros transistores tienen un desfase de 60° la una respecto de la otra, mientras que las de los 3 últimos son versiones desfasadas 180° de las de los anteriores (no confundir con secuencias invertidas), gracias a este conjunto de señales es posible reproducir voltajes de línea con desfases de 120° entre sí.

Adicionalmente se ha indicado la señal senoidal fundamental que se obtiene en el caso de usar un filtro para la eliminación de armónicos, y cuyo valor puede ser calculado utilizando la siguiente expresión:

$$V_{ef L} = 0.8165 * VDD$$

$$V_{p L} = 1.414 * V_{ef L}$$

6. Técnicas de Modulación:

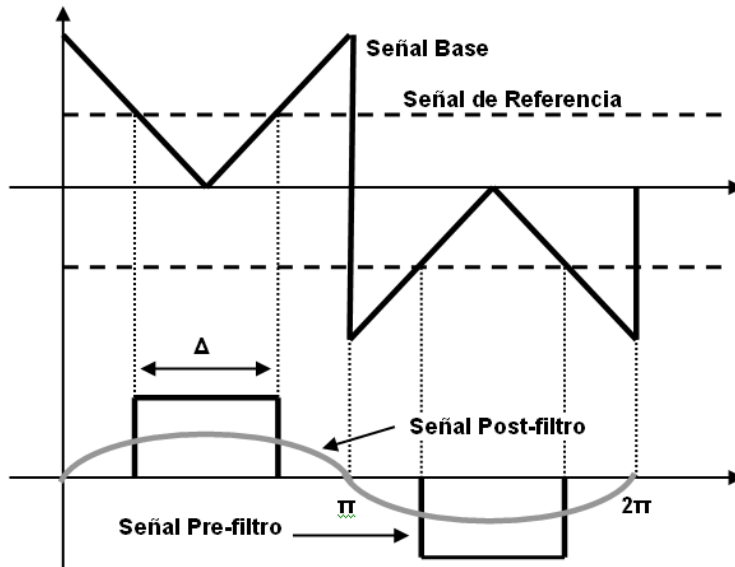
Hasta este punto se ha analizado el funcionamiento de los inversores desde un punto de vista estático, es decir, el valor del voltaje de salida es fijo, sin embargo en la práctica, estos sistemas poseen circuitos de control auxiliares que permiten regular este valor, de acuerdo a las necesidades de la carga.

Para lograr esto, es común el uso de técnicas PWM a fin de variar el voltaje eficaz de salida, y al mismo tiempo reducir la influencia de los armónicos de la señal de salida. Este último punto es de vital importancia al trabajar con inversores, ya que una técnica PWM adecuada puede facilitar el diseño del filtro de salida o incluso eliminarlo, además reduce las pérdidas en máquinas eléctricas debido a que reciben una señal senoidal más pura.

A continuación se presenta un breve estudio de las técnicas PWM básicas:

- **Modulación de Pulso Único (UPWM):**

Esta técnica de modulación, es la más sencilla de lograr, sin embargo presenta una gran desventaja en cuanto a la generación de armónicos se refiere, lo cual obliga a utilizar un diseño de filtro más complejo. A continuación se muestra las formas de onda obtenidas en un inversor monofásico en puente:



Matemáticamente el voltaje eficaz de la señal fundamental después del filtro, viene dado por la siguiente expresión:

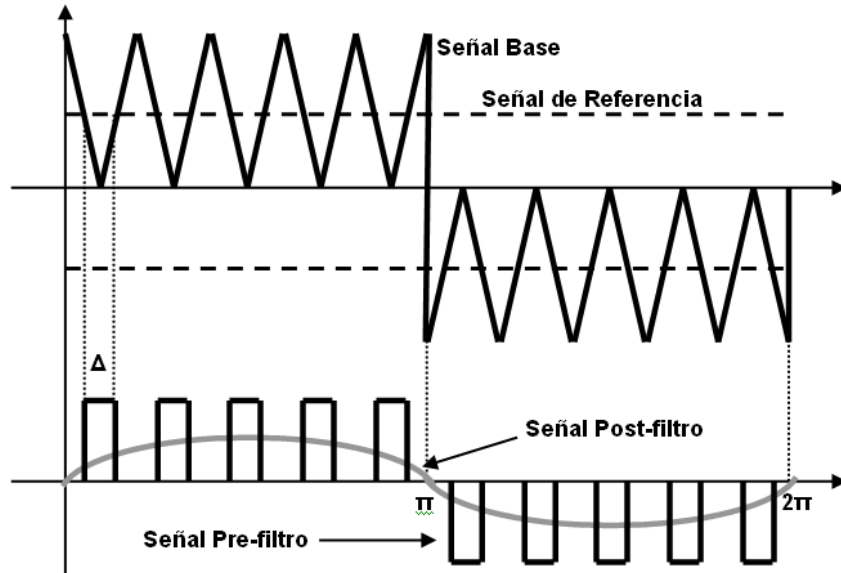
$$V_{ef} = VDD \sqrt{\frac{\Delta}{\pi}}$$

Donde:

- Δ : Duración del pulso medido en radianes.

• **Modulación de Múltiple Pulso (MPWM):**

Con la adición de un número impar de pulsos extras por ciclo, se logra una disminución considerable sobre los armónicos, disminuyendo la complejidad del filtro de salida, y aumentando el rendimiento del inversor, sin embargo aumenta la complejidad del sistema de control. A continuación se muestra las formas de onda obtenidas en un inversor monofásico en puente:



Matemáticamente el voltaje eficaz de la señal fundamental después del filtro, viene dado por la siguiente expresión:

$$V_{ef} = V_{DD} \sqrt{\frac{p\Delta}{\pi}}$$

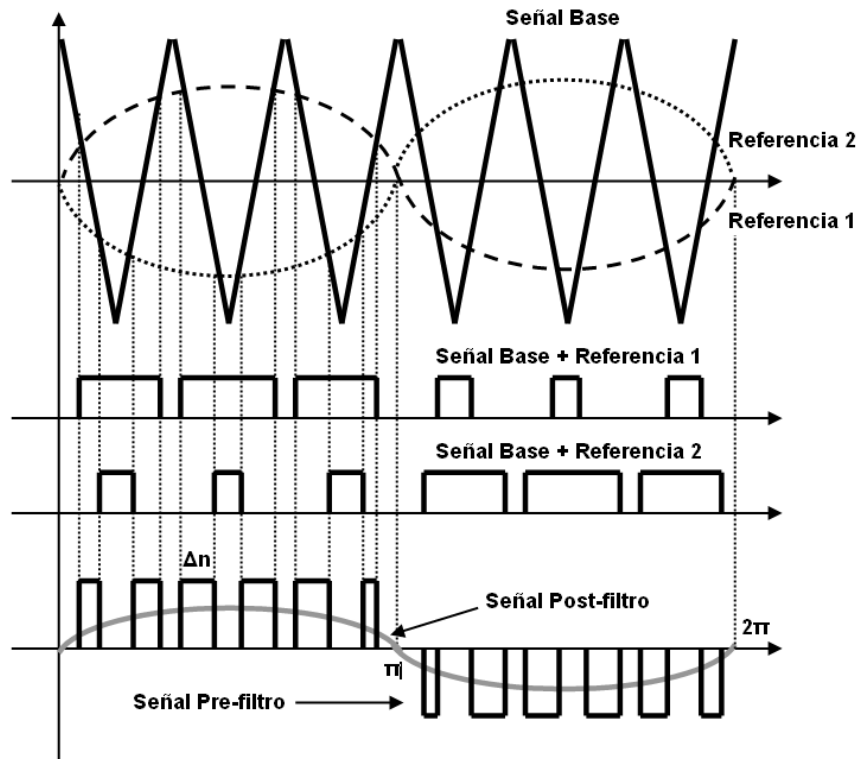
$$p = \frac{fb}{2fo}$$

Donde:

- **p:** Número de pulsos por medio ciclo.
- **fb:** Frecuencia de la señal base.
- **fo:** Frecuencia de la señal post-filtro (frecuencia deseada).

• **Modulación Senoidal (SPWM):**

Esta técnica es la más usada en aplicaciones de baja y mediana potencia, en especial para sistemas tales como UPS's y Propulsores AC, ya que presenta un rendimiento muy alto debido a una disminución de armónicos mucho mayor que la que se obtiene con la técnica MPWM. Sin embargo la generación de las señales es muy compleja, ya que requiere de 2 señales senoidales de referencia desfasadas 180° a fin de producir múltiples pulsos de diferente duración. A continuación se muestra las formas de onda obtenidas en un inversor monofásico en puente:



Matemáticamente el voltaje eficaz de la señal fundamental después del filtro, viene dado por la siguiente expresión:

$$V_{ef} = VDD \sqrt{\sum_{n=1}^p \frac{\Delta n}{\pi}}$$

$$p = \frac{fb}{2fo}$$

Donde:

- **Δn:** Duración del pulso enésimo medido en radianes.
- **p:** Número de pulsos por medio ciclo.
- **fb:** Frecuencia de la señal base.
- **fo:** Frecuencia de la señal de referencia y pre-filtro (frecuencia deseada).

Debido a la alta complejidad de los sistemas de control para generar este tipo de señales, la mayoría utiliza un sistema micro-controlado, en el cual se ha grabado de antemano la duración de los pulsos de salida, para diferentes voltajes de salida requeridos.

Existen muchos otros métodos para controlar el funcionamiento de los inversores, tales como la modulación senoidal modificada (MSPWM), modulación por desplazamiento de fase, modulación trapezoidal, modulación escalonada, etc., sin embargo estos requieren conocimientos matemáticos superiores, por lo que solo se tratan en cursos avanzados de electrónica de potencia.

En el caso de inversores trifásicos se debe generar 2 pares de ondas senoidales adicionales desfasadas 120° con respecto al primer par, pero utilizando la misma señal base a fin de mantener la sincronización entre los pulsos aplicados al puente trifásico.

EJERCICIOS

1. Se tiene un inversor monofásico push pull, que opera a partir de una batería de 12V, y se requiere controlar una carga AC de 120V. Calcule la relación de espiras del transformador para obtener dicho voltaje. **Resp.: $a = 22.22$.**
2. Se tiene un inversor monofásico en puente, que opera a partir de un conversor CA – CC que entrega una tensión de 250V. No se ha utilizado un transformador. Calcule la magnitud del voltaje eficaz de salida. **Resp.: $V_{ef} = 225V$.**
3. Se tiene un inversor trifásico en puente, que entrega una tensión de fase de 120V. No se ha utilizado un transformador. Calcule la magnitud del voltaje de CC que alimenta al inversor. **Resp.: $V_{DD} = 254.55V$.**
4. Se tiene un inversor monofásico en puente controlado mediante una técnica UPWM. Si se tienen los siguientes datos: $V_{ef} = 220V$, $V_{DD} = 300V$ y $f_o = 60Hz$. Calcule el valor del intervalo Δ en radianes y segundos. **Resp.: $\Delta = 4.48mseg$.**
5. Se tiene un inversor monofásico en puente controlado mediante una técnica UPWM. Si se tienen los siguientes datos: $V_{DD} = 340V$ y $f_o = 120Hz$. Calcule el voltaje eficaz de salida cuando el intervalo $\Delta = 2ms$. **Resp.: $V_{ef} = 235.55V$.**
6. Se tiene un inversor monofásico en puente controlado mediante una técnica MPWM. Si se tienen los siguientes datos: $V_{ef} = 220V$, $V_{DD} = 300V$, $f_o = 60Hz$ y $f_b = 360Hz$. Calcule el valor del intervalo Δ en radianes y segundos. **Resp.: $\Delta = 1.49mseg$.**
7. Se tiene un inversor monofásico en puente controlado mediante una técnica MPWM. Si se tienen los siguientes datos: $V_{DD} = 340V$, $f_o = 60Hz$ y $f_b = 600Hz$. Calcule el voltaje eficaz de salida cuando el intervalo $\Delta = 500\mu s$. **Resp.: $V_{ef} = 186.22V$.**
8. Explique qué sucedería, en el inversor tipo puente, si se presentaran las siguientes condiciones (Pregunta de Examen):
 - Uno de los transistores se daña quedando abierto.
 - Se cambia el transformador por uno con diferente "a".
 - Se cambia el tipo de modulación.
 - Se cambia el voltaje de alimentación.

OBSERVACIONES PARA LA SIGUIENTE CLASE

- Realizar en hojas perforadas los ejercicios que falten o que el profesor indique.
- Revisar los temas tratados en este módulo.
- Traer **POR PERSONA** los siguientes materiales:
 - Protoboard.
 - Multímetro.
 - Cable Multipar.
 - Pinza de Puntas Planas.
 - 2 Transistores MOSFET canal N IRF540.
 - 2 Transistores MOSFET canal P IRF9540.
 - 2 Transistores BJT NPN 2N3904.
 - 4 Diodos 1N4148.
 - 4 Resistencia de $1K\Omega$ 1/4W.
 - 1 Batería de 12V.
 - 1 **Transformador de 6V – 0V – 6V / 110V / 2A.**

* Se recuerda que los materiales serán revisados antes de empezar la práctica, en caso de no disponer de los mismos o tenerlos incompletos se disminuirá la nota de la práctica de ese día de acuerdo al caso.

