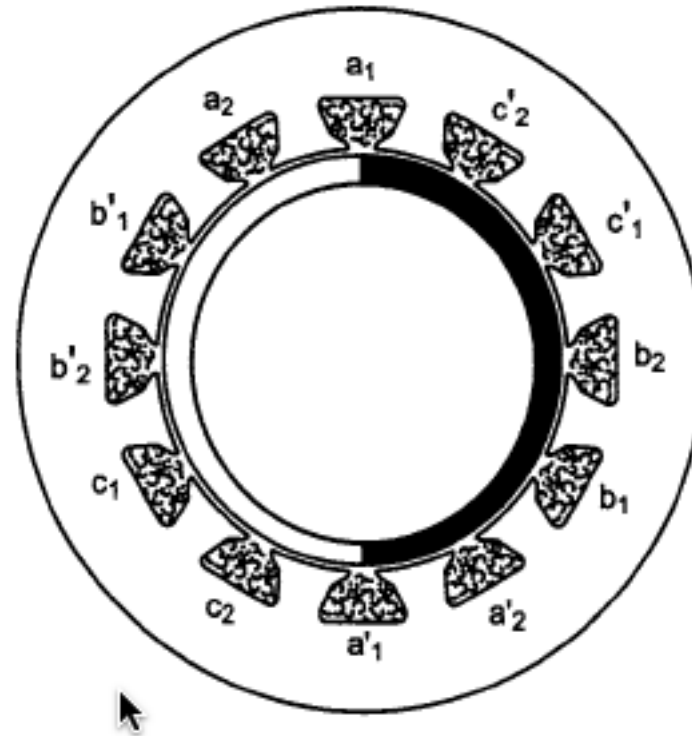


Principios de operación de la máquina BLDC con sensores de posición.

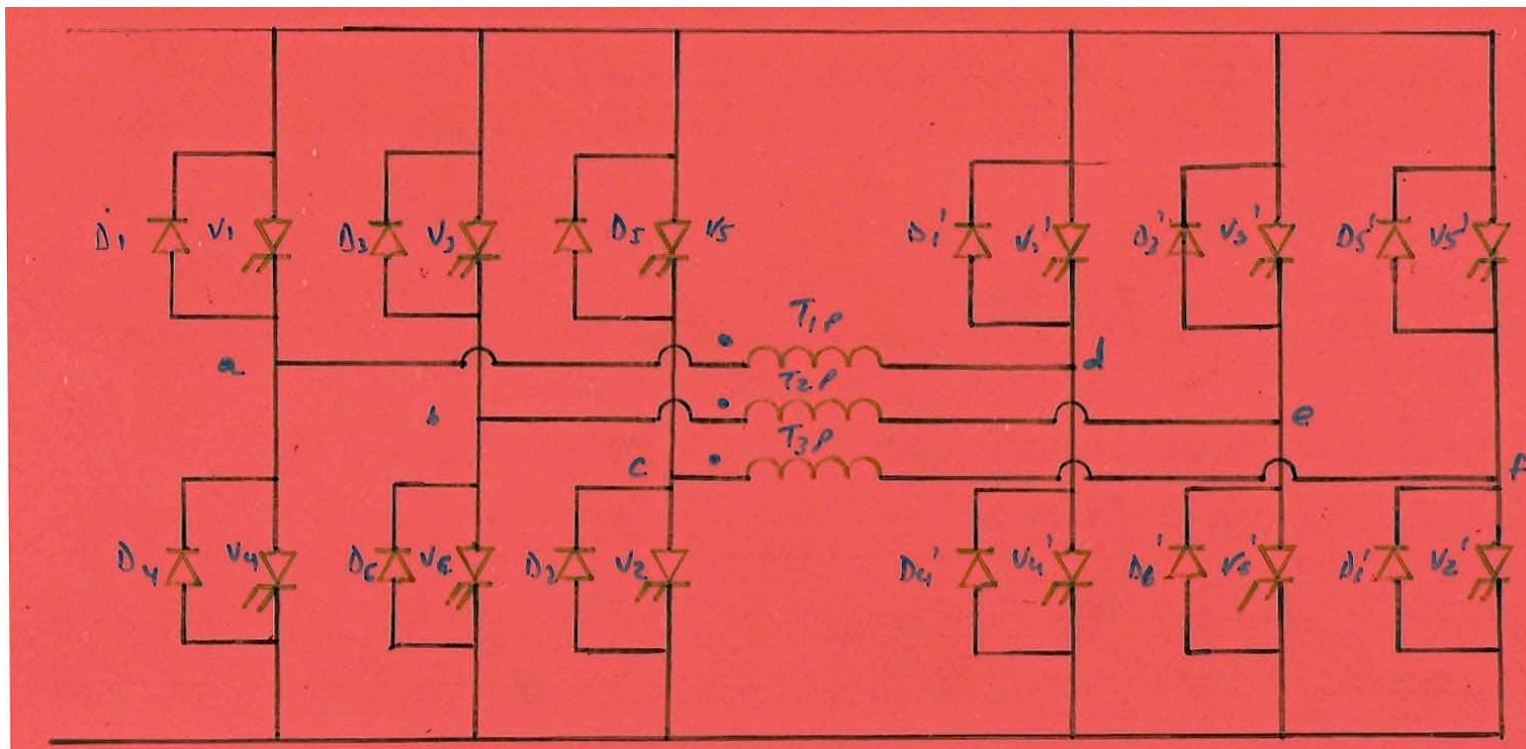


La figura muestra el corte de un BLDC trifásico con un par de polos en el rotor, con dos ranuras y dos arrollados por cada fase del estator. (a₁ en serie con a₂; b₁ en serie con b₂, c₁ en serie con c₂).

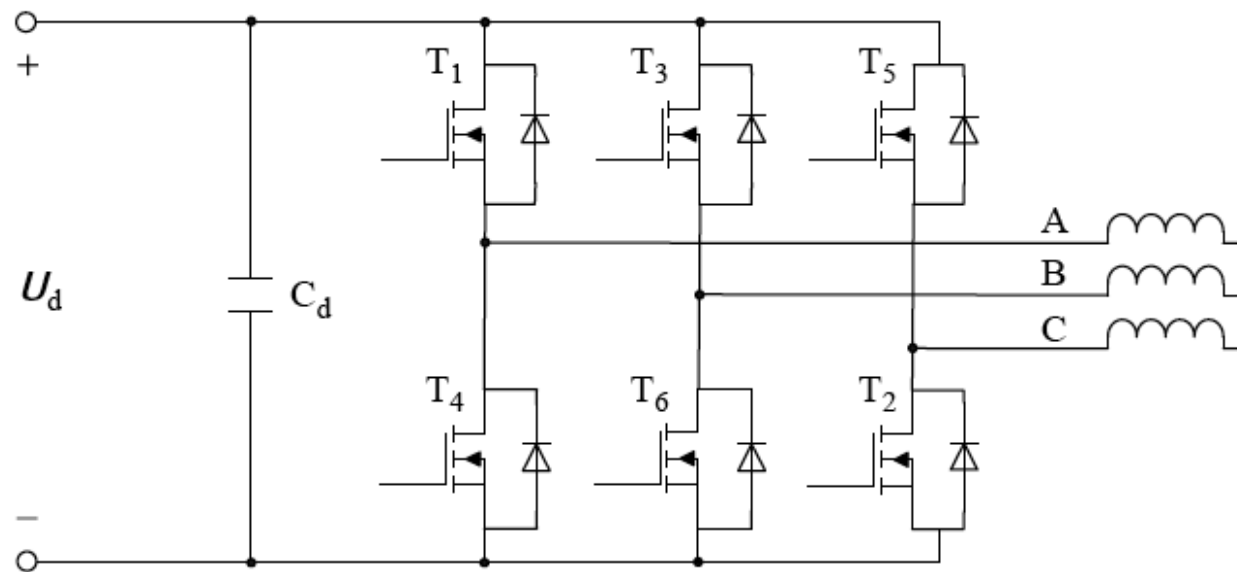
Las bobinas están distribuidas simétricamente en el estator, todas las bobinas tienen el mismo número de vueltas y el intervalo entre ranuras es de 30° .

Idealmente cada fase del estator debería ser energizada por separado, y además debería ser posible energizarla tanto con tensión positiva como negativa.

Para energizar en forma independiente cada fase con cualquiera de las dos polaridades sería preciso disponer de un BLDC con acceso independiente a las tres parejas de terminales de las fases, alimentando cada fase en forma independiente con un puente H.



En la práctica por razones de economía y de estandarización no se dispone de máquinas BLDC con bobinas totalmente independientes y la alimentación se realiza conectando las tres fases a un inversor medio-puente trifásico.



Esta conexión introduce una primera limitación, porque con ella no es posible energizar cada fase por separado : si solo se enciende un conmutador, no se puede alimentar ninguna fase.

Las conexiones que permiten alimentar solo dos fases son.

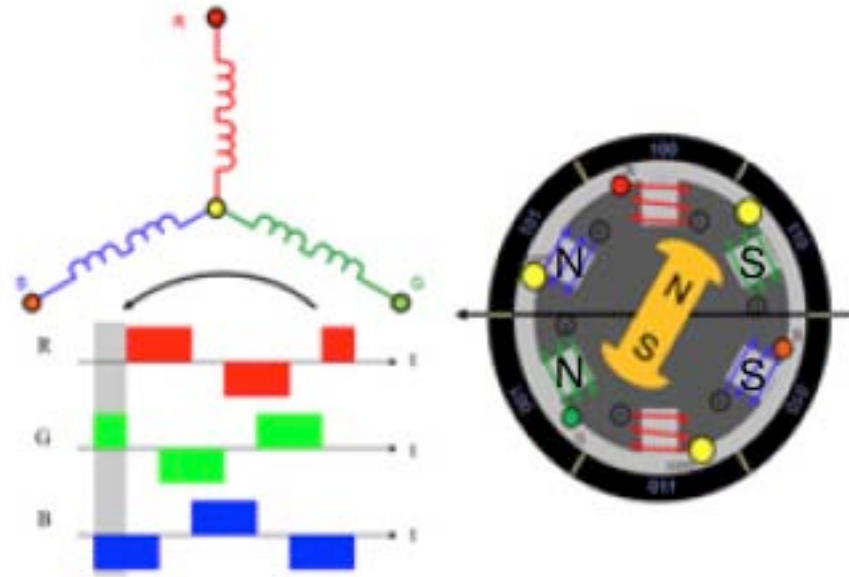
Dispositivos encendidos	Fases conectadas
$T_1 \& T_6$	A^+-N-B^-
$T_3 \& T_4$	B^+-N-A^-
$T_3 \& T_2$	B^+-N-C^-
$T_2 \& T_3$	C^+-N-B^-
$T_1 \& T_2$	A^+-N-C^-
$T_5 \& T_4$	C^+-N-A^-

Es por lo tanto posible energizar cada fase con ambas polaridades, pero siempre en combinación serie con otra fase.

En principio es posible operar también con la máquina BLDC si las fases están conectadas en delta; en este caso también es posible alimentar cada fase con corriente de las dos polaridades, pero con la complicación adicional de que ahora en cada conexión se energizan las tres fases, una individual en paralelo con las otras dos conectadas en serie.

Operaciones requeridas para lograr un giro completo.

Giro en sentido horario: Primer paso.



Punto amarillo indica conexión a neutro.

Se energizan las bobinas verde (fase C) y azul (fase B) en la combinación C^+-N-B^- , encendiendo los MOSFETs T_5 y T_6 . El rotor gira en la dirección horaria, y sus polos S-N se alinean con los polos N-S definidos en la bobina C.

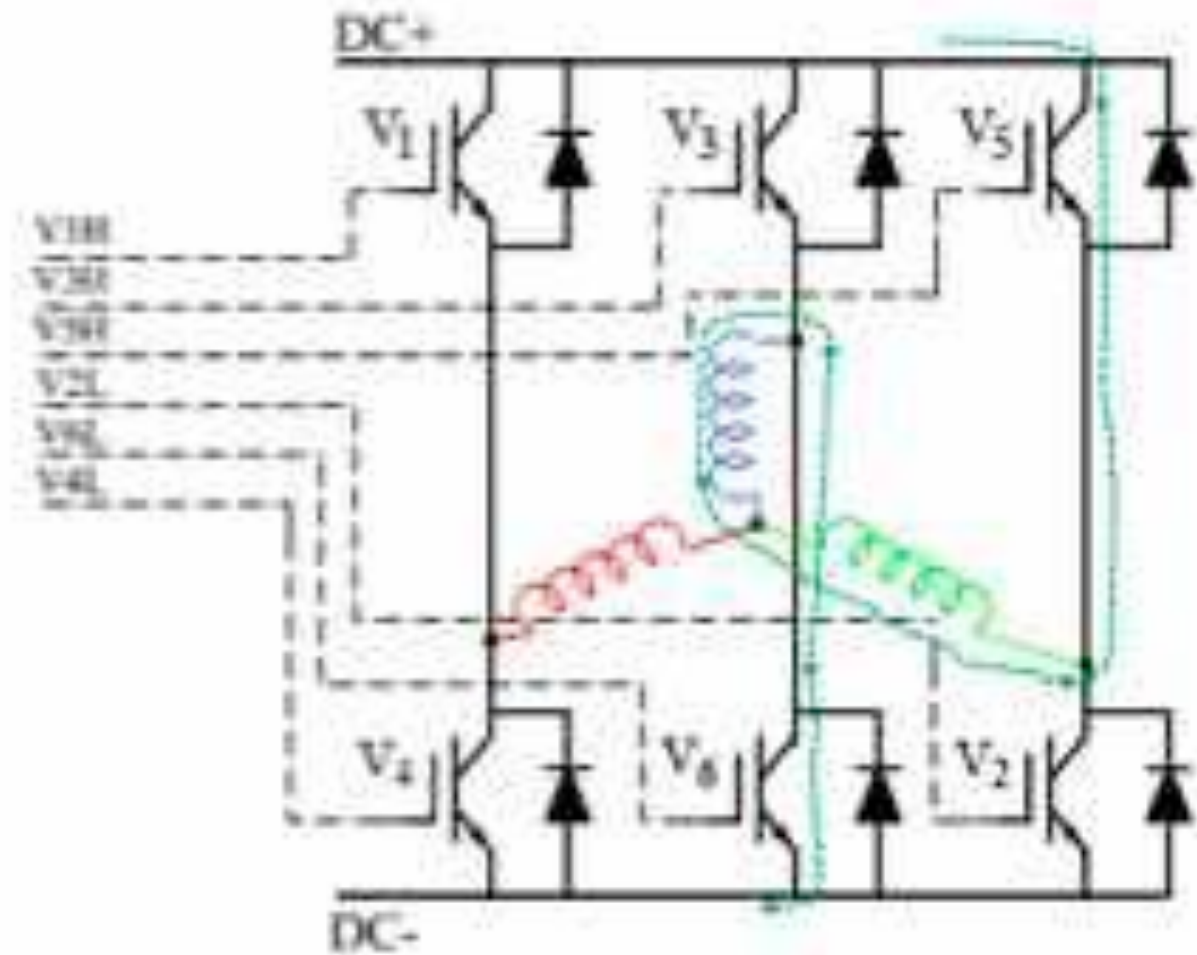
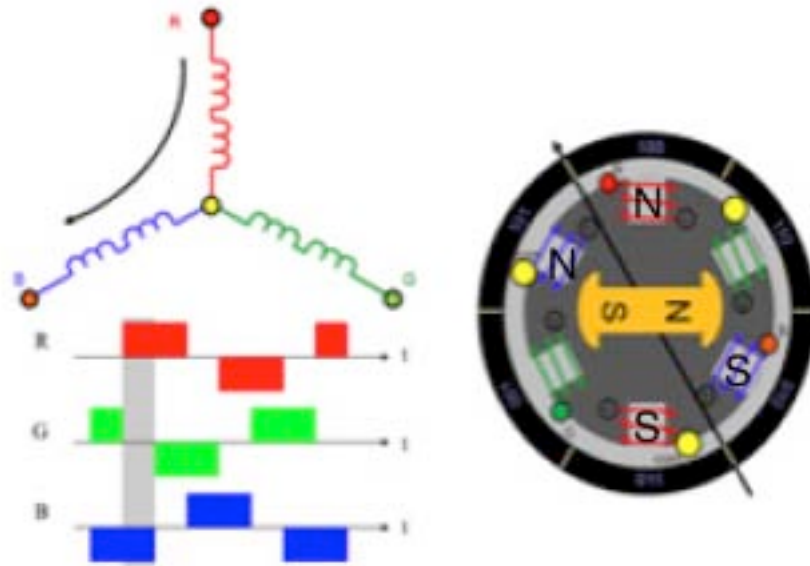


Diagrama de circulación de la corriente en el primer paso del giro en sentido horario.

Giro en sentido horario: Segundo paso.



Punto amarillo indica conexión a neutro.

Se energizan las bobinas roja (fase A) y azul (fase B) en la combinación A^+-N-B^- , encendiendo los MOSFETs T_1 y T_6 . El rotor gira en la dirección horaria, y sus polos S-N se alinean con los polos N-S definidos en la bobina B.

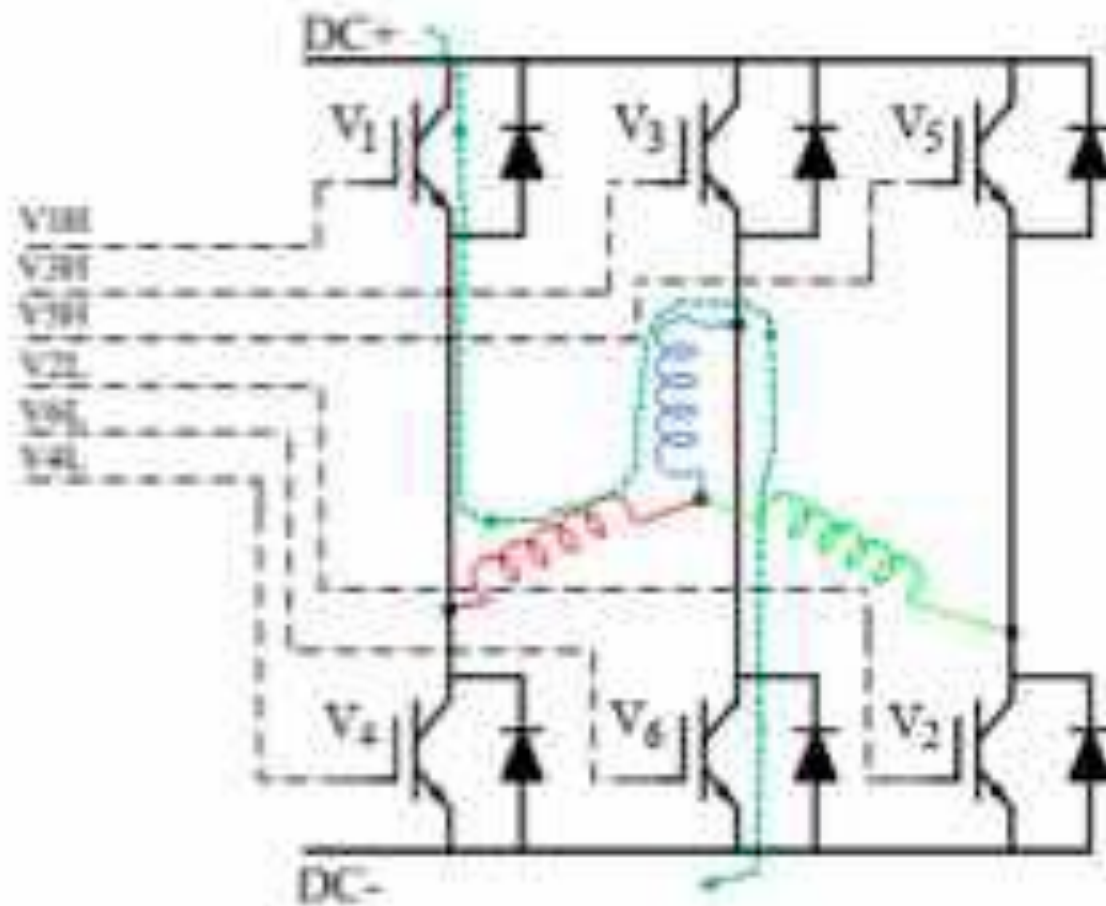
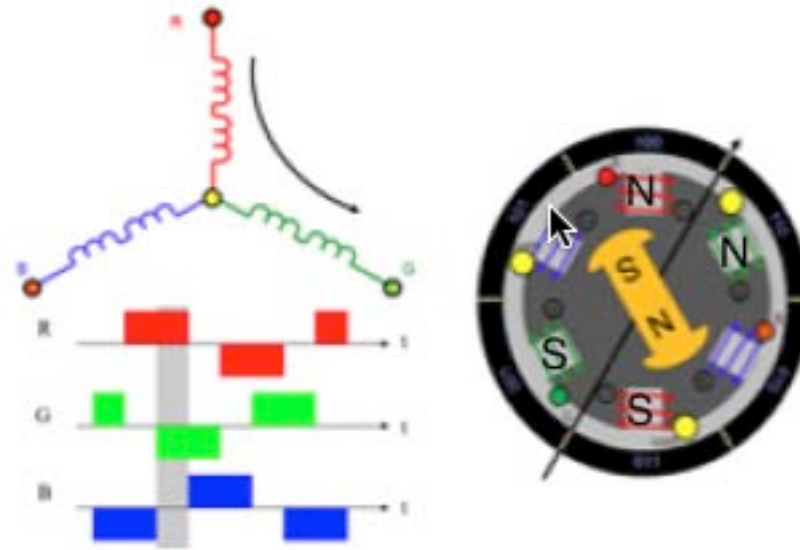


Diagrama de circulación de la corriente en el segundo paso del giro en sentido horario.

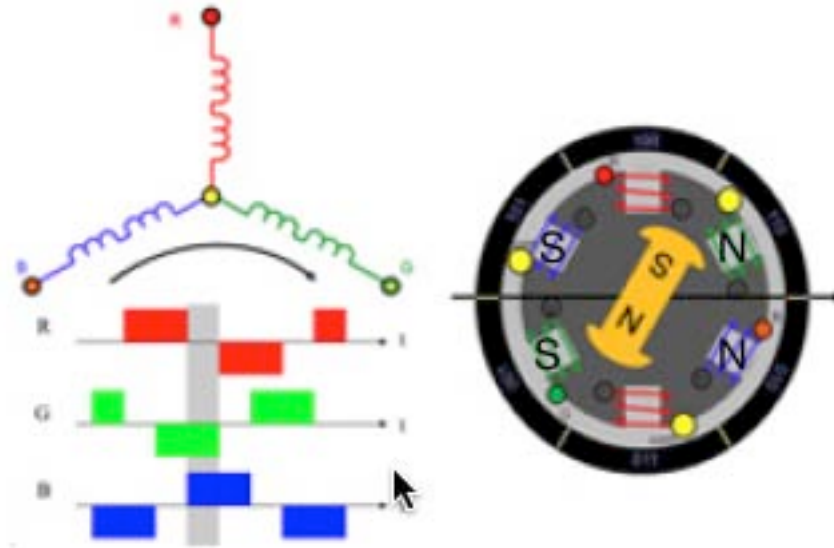
Giro en sentido horario: Tercer paso.



Punto amarillo indica conexión a neutro.

Se energizan las bobinas roja (fase A) y verde (fase C) en la combinación A^+-N-C^- , encendiendo los MOSFETs T_1 y T_2 . El rotor gira en la dirección horaria, y sus polos S-N se alinean con los polos N-S definidos en la bobina A.

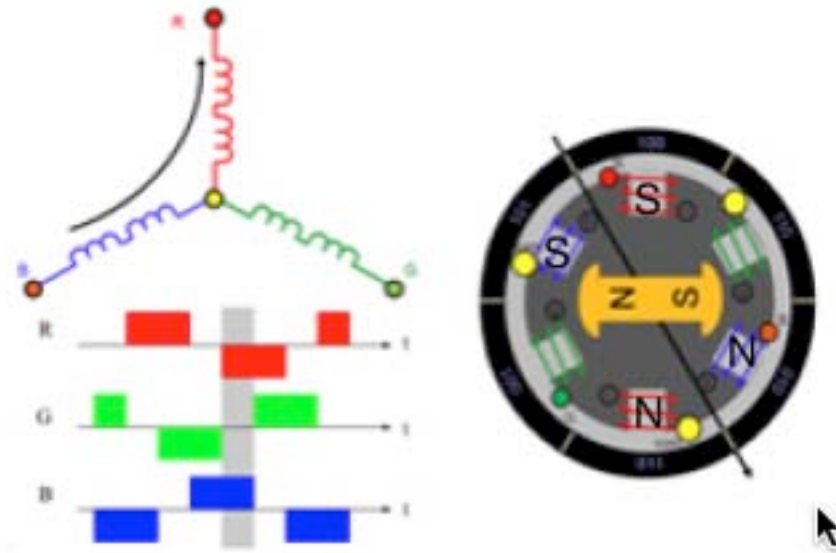
Giro en sentido horario: Cuarto paso.



Punto amarillo indica conexión a neutro.

Se energizan las bobinas azul (fase B) y verde (fase C) en la combinación B⁺-N-C⁻, encendiendo los MOSFETs T₃ y T₂. El rotor gira en la dirección horaria, y sus polos S-N se alinean con los polos N-S definidos en la bobina C.

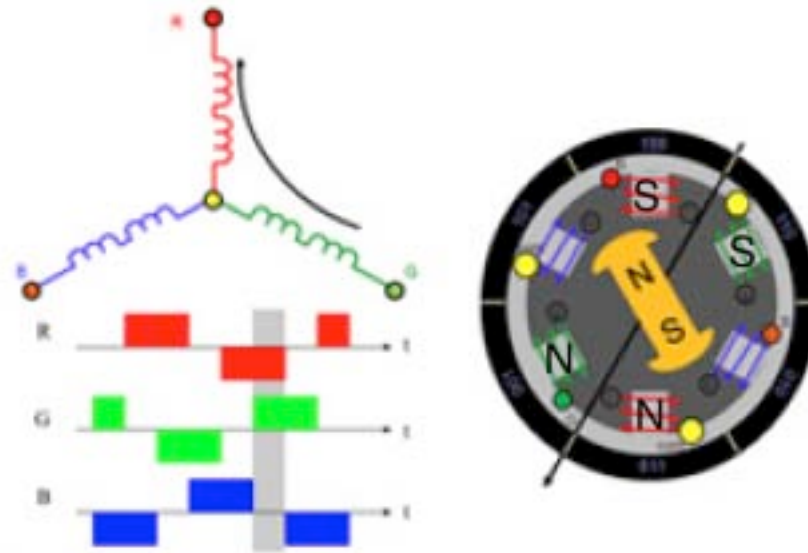
Giro en sentido horario: Quinto paso.



Punto amarillo indica conexión a neutro.

Se energizan las bobinas azul (fase B) y roja (fase A) en la combinación B^+-N-A^- , encendiendo los MOSFETs T_3 y T_4 . El rotor gira en la dirección horaria, y sus polos S-N se alinean con los polos N-S definidos en la bobina B.

Giro en sentido horario: Sexto paso.



Punto amarillo indica conexión a neutro.

Se energizan las bobinas verde (fase C) y roja (fase A) en la combinación C⁺-N-A⁻, encendiendo los MOSFETs T₅ y T₄. El rotor gira en la dirección horaria, y sus polos S-N se alinean con los polos N-S definidos en la bobina A.

Esta secuencia de pasos se debe mantener indefinidamente, repitiéndose una vez en cada vuelta mientras se desee que la máquina BLDC gire en el sentido horario.

Para que la máquina gire en sentido anti-horario la secuencia de pasos debe recorrerse en orden inverso.

El cambio de un estado al siguiente en la secuencia se produce cuando lo indique el sensor de posición.

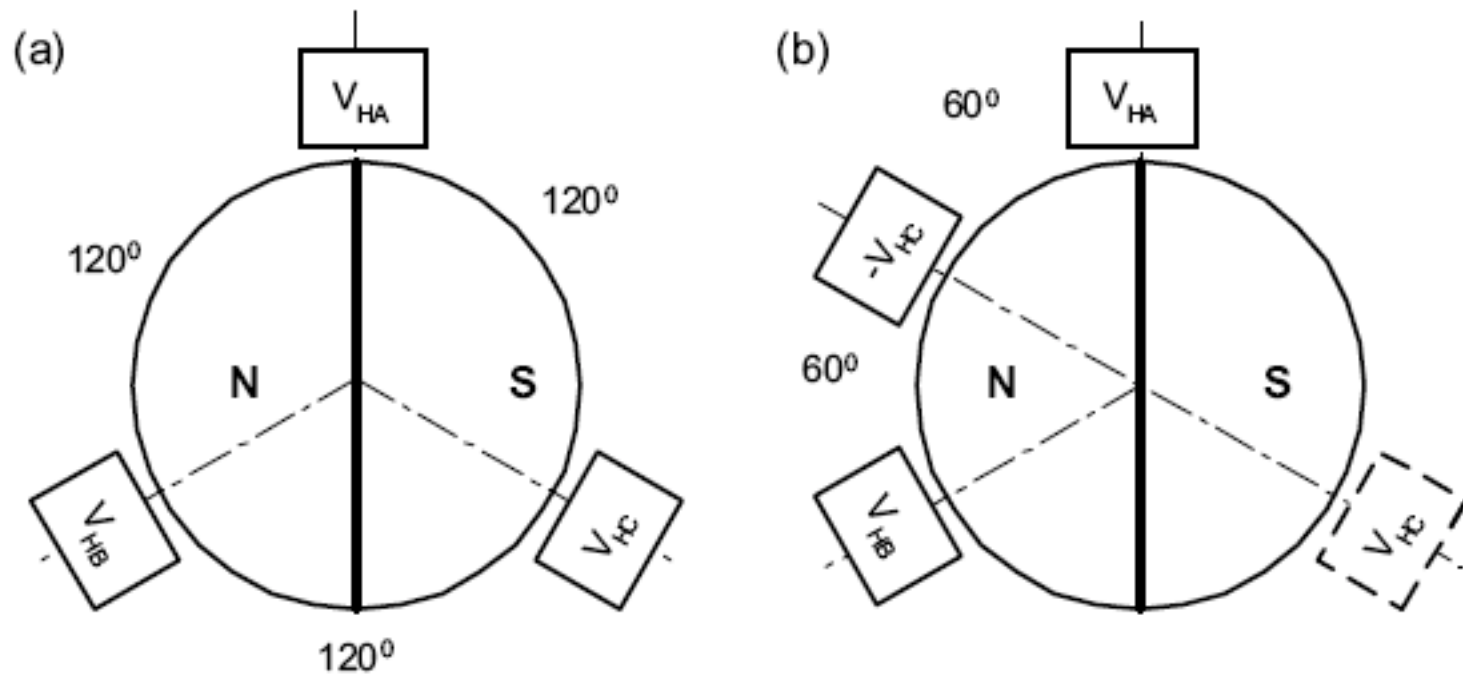
La frecuencia básica de conmutación es variable, e igual a 6 veces la frecuencia de giro del rotor, que es la relación velocidad angular/frecuencia de conmutación característica de este motor; en el caso genérico con N fases y M pares de polos magnéticos la relación es $2NM$.

Falta por definir la relación entre la información proporcionada por el sistema de detección de posición y la secuencia de encendido de los MOSFETs.

Dado que el ciclo está formado por seis estados, es preciso que la información de posición tenga tres bits.

En la generalidad de los casos las señales de posición del rotor son producidas por un arreglo de sensores de efecto Hall.

Para la configuración básica, con tres fases y un par de polos magnéticos en el rotor, las configuraciones más usuales emplean tres sensores Hall.

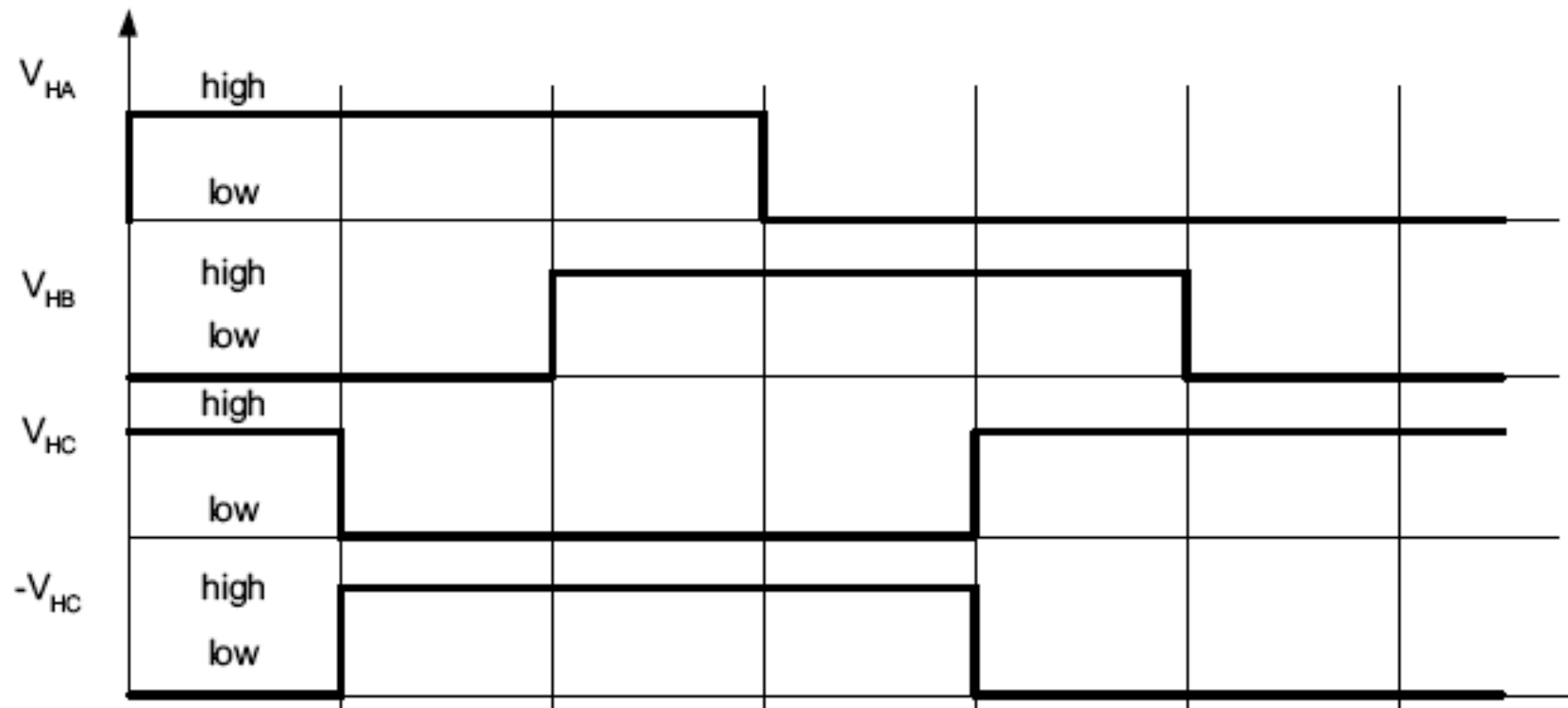


La figura muestra dos esquemas básicos de colocación de los sensores Hall:

- a) Espaciados 120°
- b) Espaciados 60°

Cada sensor produce un nivel positivo mientras el polo norte está enfrente del sensor, y un nivel negativo cuando es el polo sur.

Las salidas son:



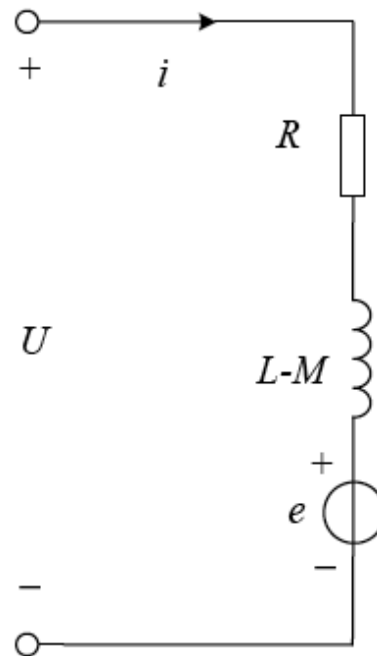
Una posible implementación, para generar las señales de disparo de los conmutadores del puente inversor con un arreglo de sensores desfasados 120° es la siguiente

Salida del sistema de detección posición			MOSFETs "ON"
0	0	1	T_5 y T_6
0	1	1	T_1 y T_6
0	1	0	T_1 y T_2
1	1	0	T_3 y T_2
1	0	0	T_3 y T_4
1	0	1	T_5 y T_4

La posición de arranque del motor puede corresponder a cualquiera de los seis estados posibles; para girar en la dirección horaria la secuencia de estados en la tabla de conmutaciones se debe leer "hacia abajo" desde la posición inicial, y para girar en sentido anti-horario se debe leer "hacia arriba". La operación es por supuesto cíclica: al llegar a un extremo de la tabla se debe saltar al otro extremo para realizar la siguiente conmutación.

Operación de la "máquina BLDC con sensores de posición" en lazo abierto.

El modelo equivalente de la máquina BLDC con sensores de posición alimentada con un tren de pulsos rectangulares $U(t)$ es:



Las ecuaciones que definen el comportamiento de la máquina BLDC como convertidor electromecánico de energía son las siguientes:

1.- Ecuación eléctrica:

$$u(t) = i(t)R + L_M \frac{di(t)}{dt} + e_\omega(t)$$

2.- Ecuaciones de conversión electromecánica:

$$T_e(t) = k_\phi i(t)$$

$$e_\omega(t) = k_\phi \omega(t)$$

3.- Ecuación mecánica:

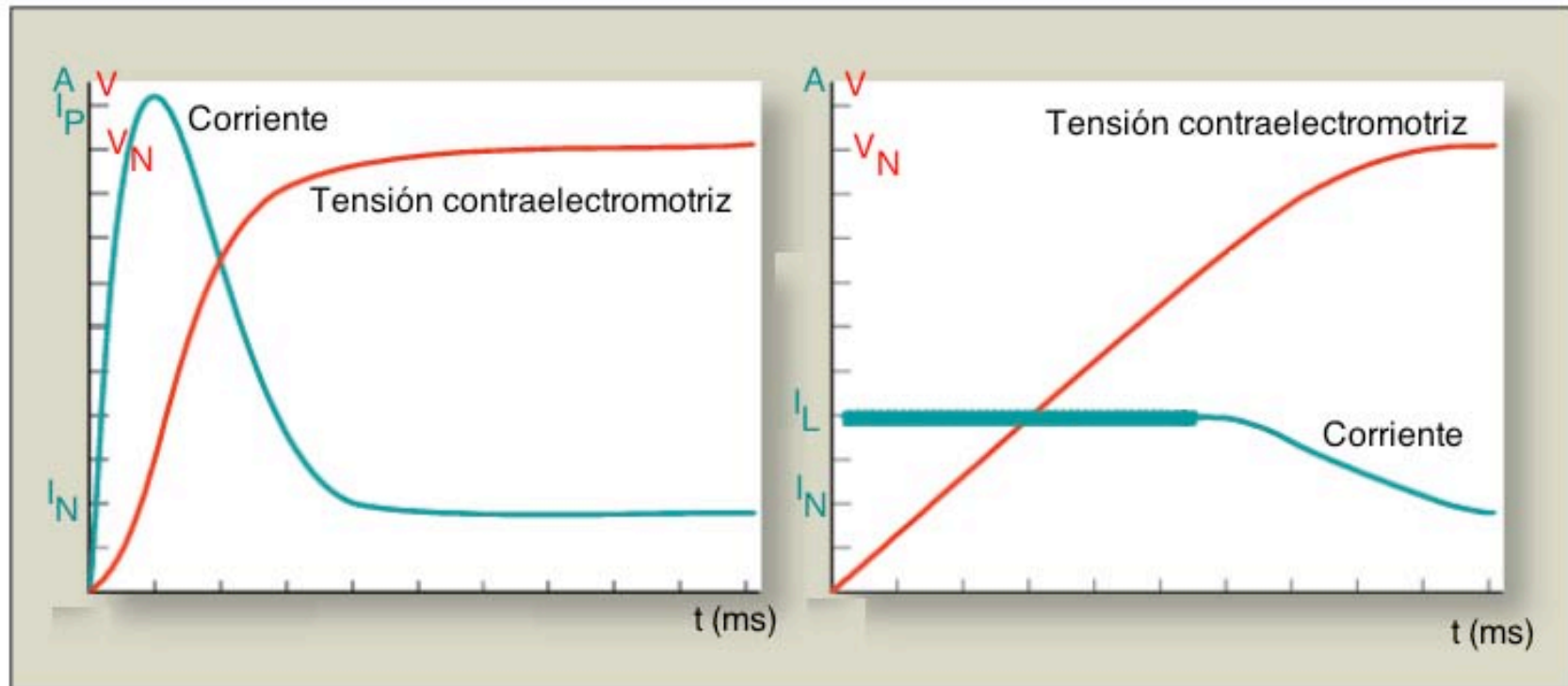
$$T_e(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_L(t)$$

En estas condiciones, si se alimenta el puente inversor y la máquina opera como motor en lazo abierto, esto es, sin un control adicional de par, velocidad o posición, ω aumentará hasta que se llegue a estabilizar en la velocidad de equilibrio, ω_{eq} , dada por:

$$T_e|_{\omega_{eq}} = B\omega_{eq} + T_L|_{\omega_{eq}}$$

Si el motor no está conectado a una carga mecánica ($T_L=0$), la velocidad de equilibrio que se alcanza es la velocidad sin carga, que es la máxima que se puede alcanzar operando en condiciones de tensión de alimentación nominal.

Sobre corriente de arranque.



Evolución de la corriente en las bobinas y de la tensión contraelectromotriz.

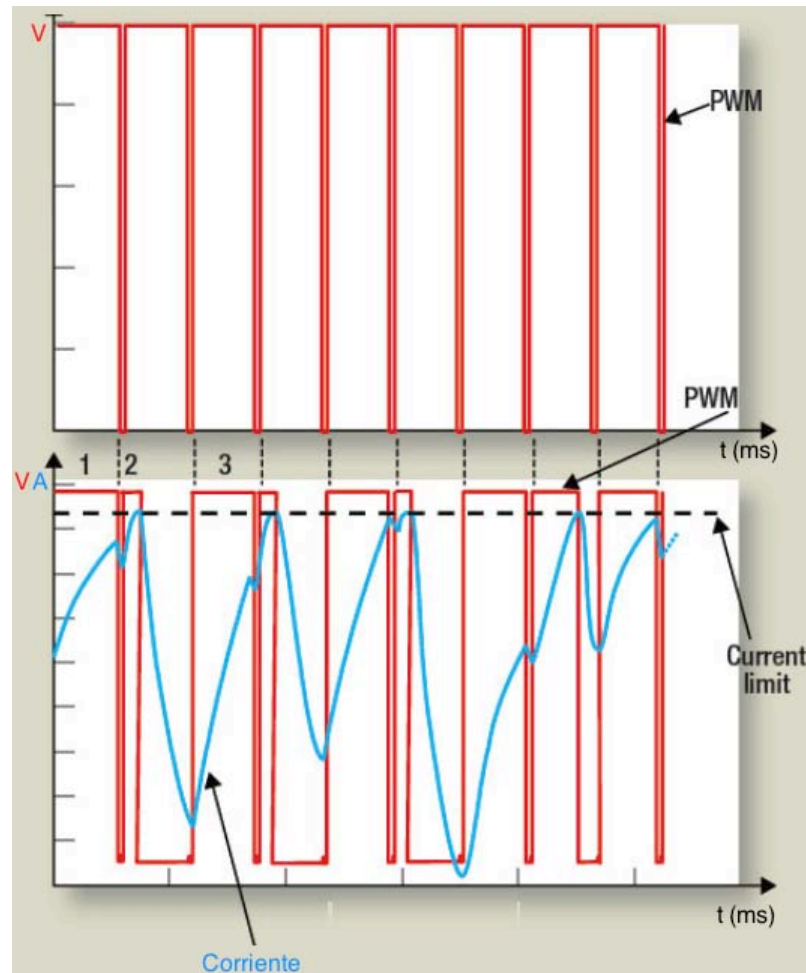
Izquierda: Arranque sin limitación de corriente.

Derecha: Arranque con limitación de corriente

Por las mismas razones que en el motor DC con escobillas, hasta que no se alcanza una cierta velocidad y la tensión contraelectromotriz se hace significativa, la corriente en las bobinas queda limitada solamente por la impedancia R-L del circuito, por lo que el valor pico alcanzado puede ser significativamente mas alto que la corriente nominal de operación; si se acepta esta condición los componentes de electrónica de potencia del actuador deben dimensionarse para la corriente pico de arranque, que puede ser 10 o mas veces mayor que la corriente nominal de operación, que normalmente significa un costo correspondientemente mayor.

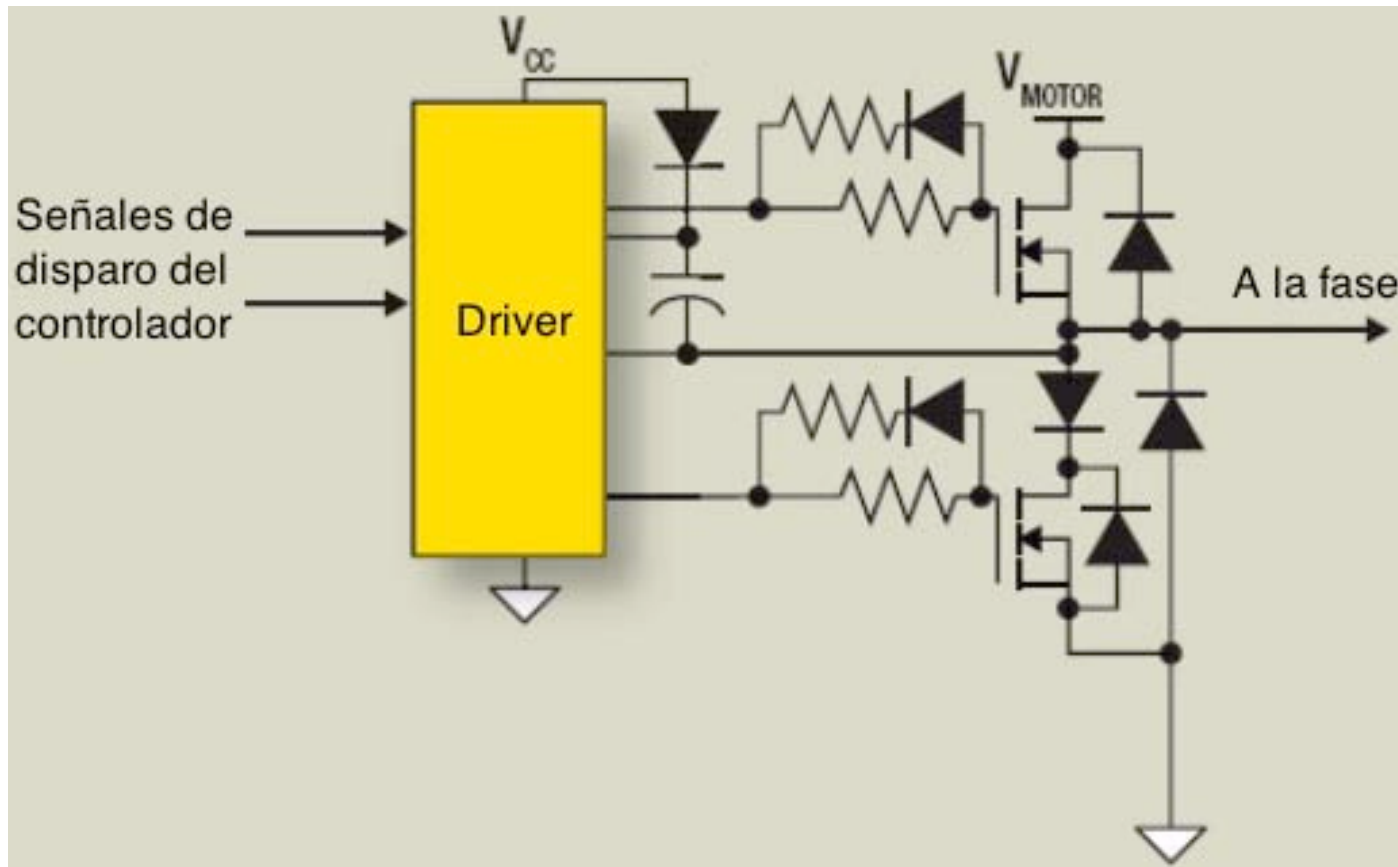
Por otra parte el par producido por esta sobre-corriente también es significativamente mayor que el par nominal, por lo que el motor tiende a acelerar con mayor rapidez.

Usualmente no se justifica el costo adicional de sobre-dimensionar la etapa de potencia del actuador, por lo que en el circuito de control de la modulación PWM se debe incluir un mecanismo que detecte cuando la corriente sobrepasa el límite permitido y termine el pulso aplicado en ese momento.



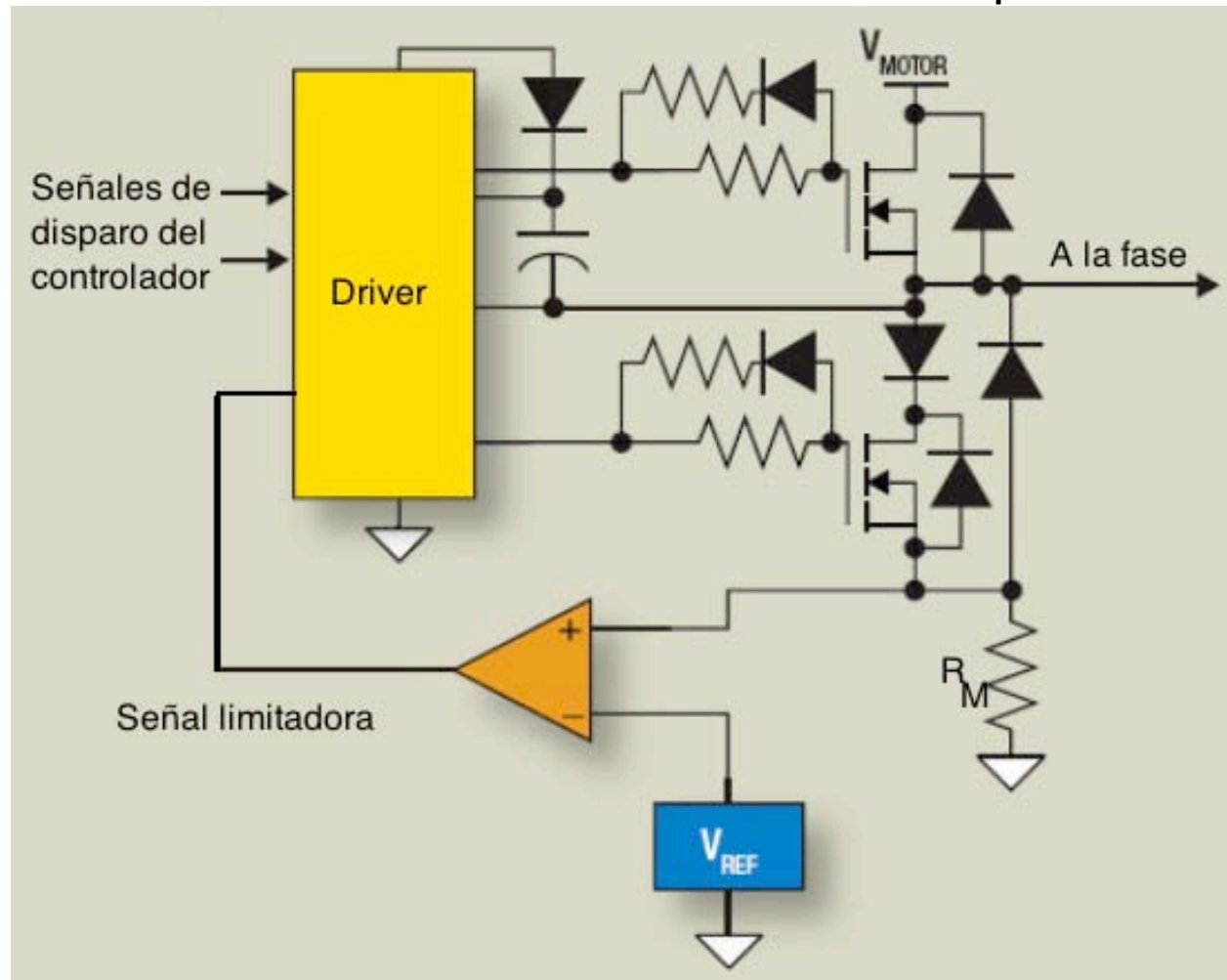
Señales PWM aplicadas.
 Arriba: Sin limitación de corriente.
 Abajo: Con limitación de corriente

En general la etapa básica de potencia para manejar cada fase de un motor BLDC de potencia baja-media es una columna inversora:

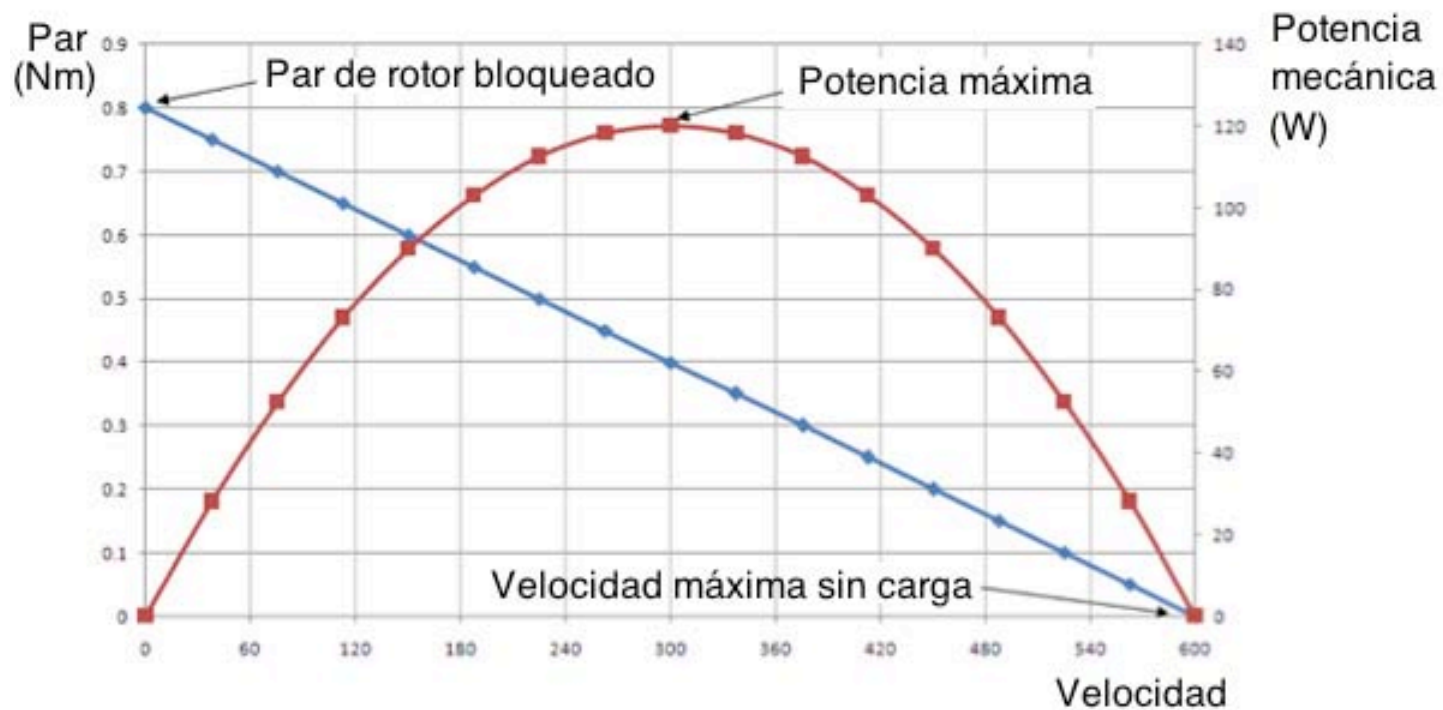


Implementación de una columna inversora típica.

Por lo que incluir el circuito limitador de la corriente de arranque ciclo a ciclo es relativamente simple.



El comportamiento en lazo abierto de la "máquina BLDC con sensores de posición" operando como motor queda definido por las siguientes curvas:



Existen tres formas de operar el motor BLDC.

1. Con fuerza contra-electromotriz trapezoidal y un inversor de “seis pasos”.

Es la operación básica ya descrita, la uniformidad de la rotación se asegura con un diseño cuidadoso del motor, y el control de velocidad se obtiene con un conversor DC/DC previo a la entrada del inversor o mediante modulación PWM de alta frecuencia en el mismo inversor.

En estas condiciones la fuerza contra-electromotriz no utiliza en forma óptima las capacidades del circuito magnético, lo que obliga a sobredimensionar el motor, que no se puede optimizar en términos de masa, momento de inercia y rendimiento, lo que limita esta estrategia a motores de hasta algunas decenas de kW.

2.- Fuerza contra-electromotriz sinusoidal e inversor de seis pasos.

Se combina un motor con bobinados distribuidos con un inversor PWM de alta frecuencia para compensar el rizado de par residual (y el ruido acústico asociado) que aumenta cuando se opera en el límite superior de ancho de banda del controlador.

La mayoría de los actuadores BLDC de altas prestaciones son de este tipo

3.- Distribución sinusoidal con inversor sinusoidal.

El motor BLDC de bobinado sinusoidal se combina con un inversor modulado sinusoidalmente en frecuencia, fase y amplitud.

La posición angular del rotor se debe conocer con gran precisión, usualmente mediante un resolver. El inversor se opera como fuente de corriente; la fase de la salida se engancha con el ángulo de posición del rotor en el ángulo óptimo de 90° y la amplitud es la variable de control para regular la magnitud del campo.

Esta configuración ofrece la mejor combinación de utilización de la capacidad del motor y respuesta en alta frecuencia, pero es la más costosa, principalmente debido al resolver y su circuitería asociada. Por otra parte el costo del sistema de medición puede justificarse ya que la información precisa de la posición angular del eje del motor puede ser usada también en el lazo externo de control de posición del servosistema.

En estas condiciones discutir si el actuador es del tipo BLDC o síncrono es de interés puramente académico.

Operación de la "máquina BLDC con sensores de posición" en lazo cerrado.

En general una aplicación mecatrónica requiere que se controlen las variables aceleración, velocidad y posición (o alguna combinación de estas), para lo cual es preciso controlar el par generado por motor.

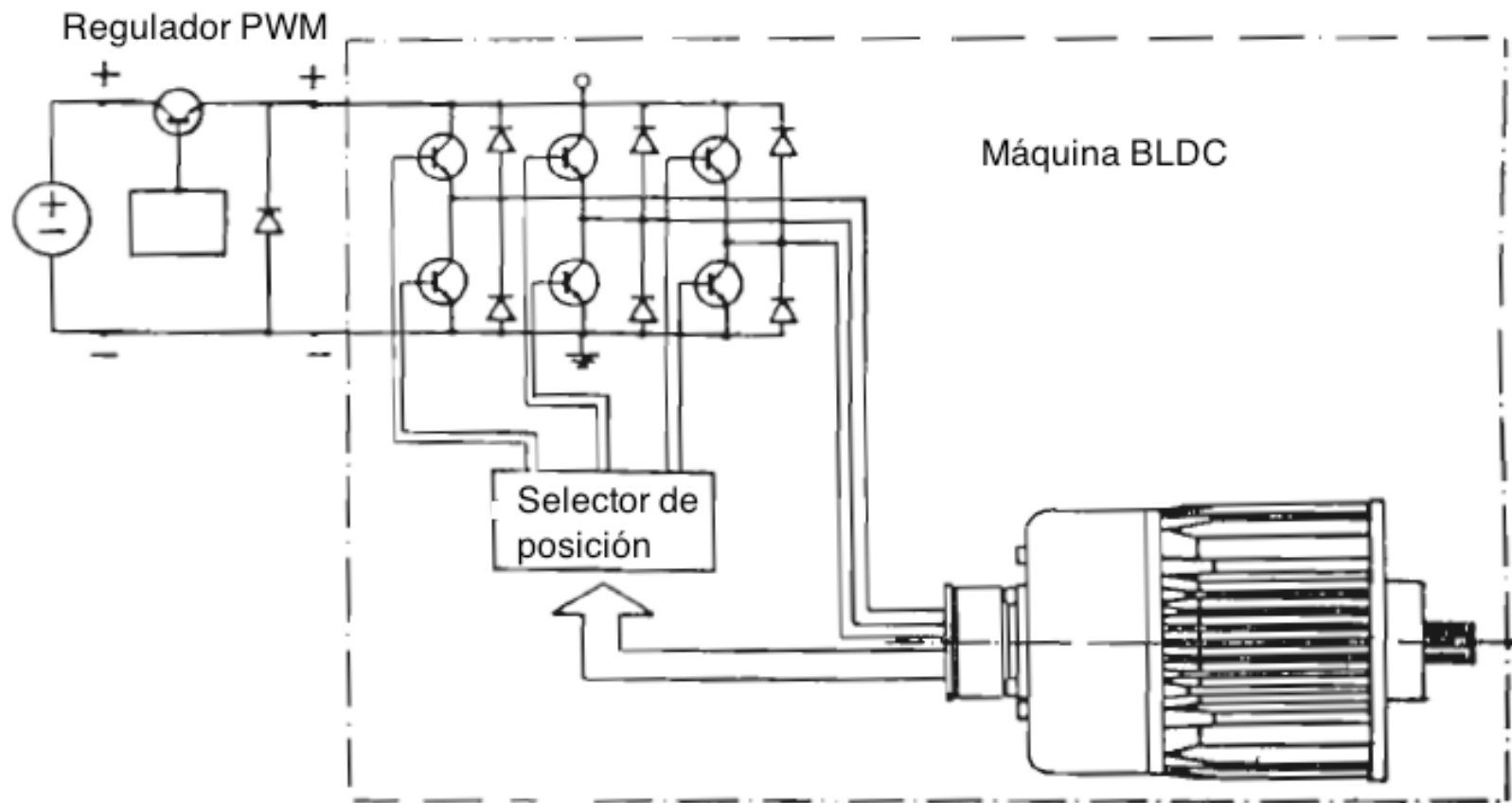
El par se controla en base a la corriente de fase, la cual a su vez se controla regulando la tensión aplicada a las bobinas, mediante una modulación de ancho de pulso (PWM) de la tensión de entrada.

Existen dos formas generales de realizar el control PWM de la tensión aplicada.

1.- Control de la tensión DC de alimentación al puente inversor.

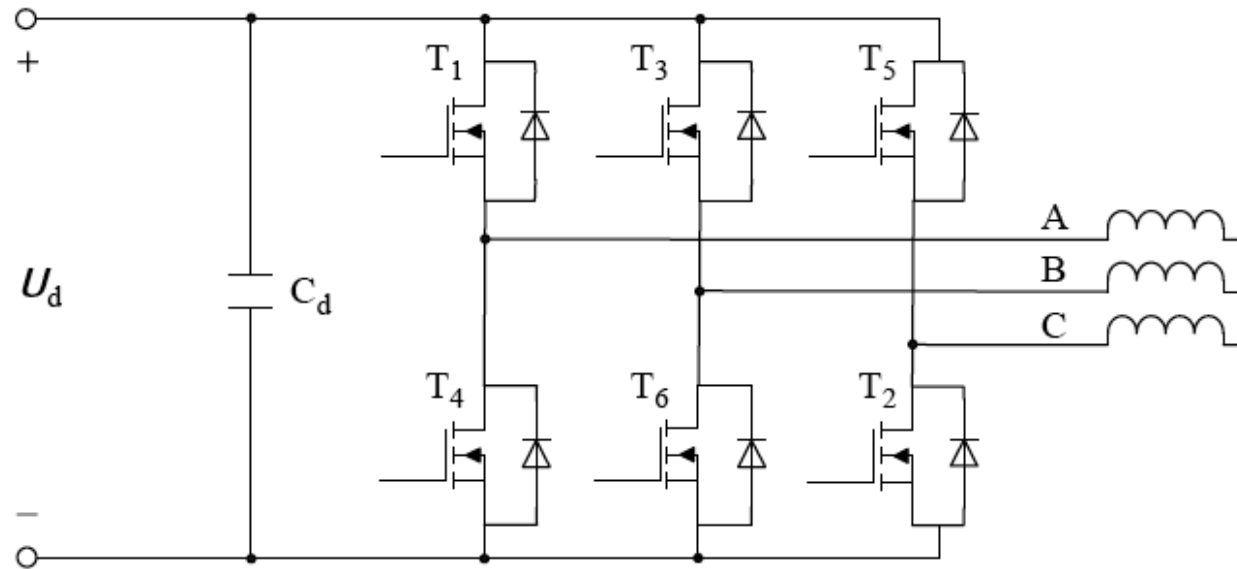
Esta configuración requiere una etapa conmutadora adicional, para realizar la modulación, lo que incrementa los costos y, casi con seguridad, las pérdidas de conmutación, pero minimiza el número de conmutaciones que deben realizar los conmutadores del puente, y puede ser adecuada para aplicaciones de alta potencia.

El puente inversor es totalmente bidireccional en lo que respecta al flujo de energía, por lo que permite el frenado dinámico regenerativo; si se desea esta opción en esta configuración, la etapa reguladora de la tensión DC de entrada al puente debe también ser bidireccional, o se debe incluir una etapa con un troceador y una resistencia de disipación.



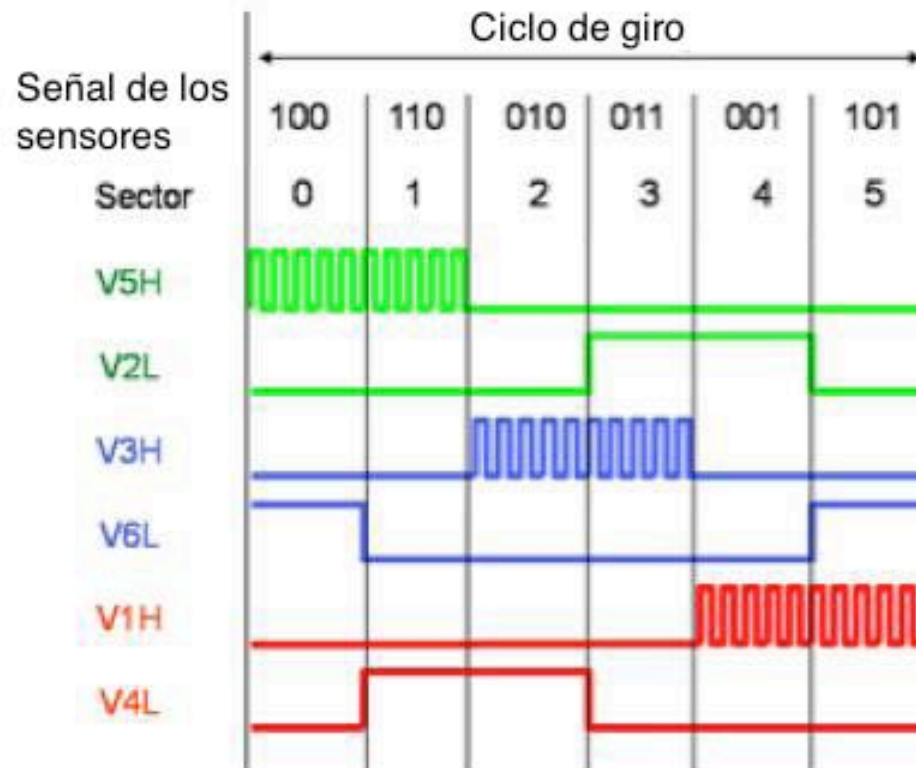
Control de la tensión de entrada al inversor con regulador PWM tipo "convertidor reductor", mono-direccional en el flujo de energía.

2.- Control PWM directo en el puente inversor.

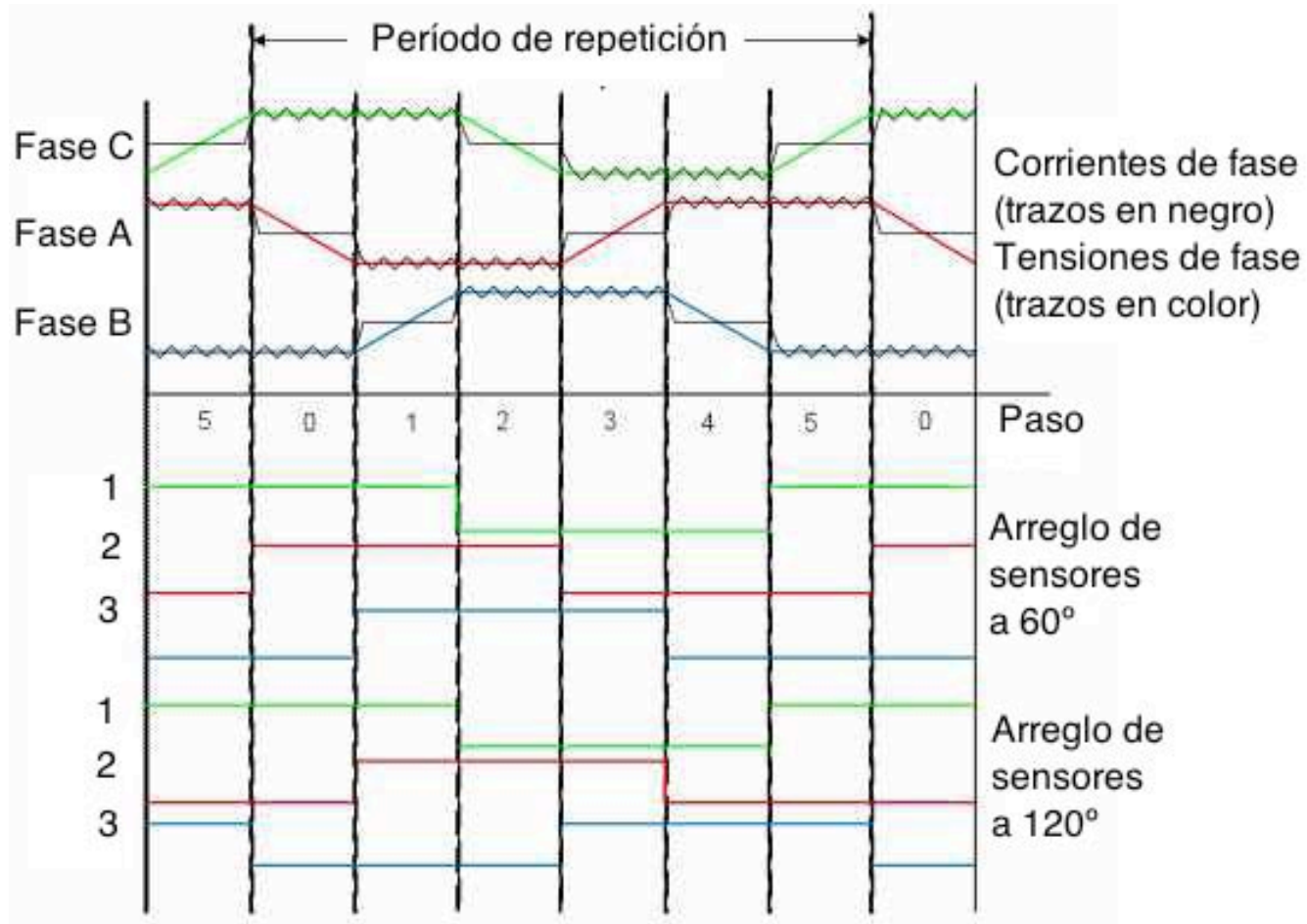


Esta configuración no requiere componentes adicionales, pero por lo menos la mitad de los conmutadores del puente deben de ser capaces de operar con altas frecuencias de conmutación.

Usualmente la señal PWM se aplica solo a tres conmutadores (T_1 , T_3 , T_5 , o T_2 , T_4 , T_6).



Señales de control aplicadas a los conmutadores del puente inversor para realizar el control de corriente en el BLDC.



Formas de onda de corriente, tensión contraelectromotriz y sensores de posición, BLDC con control de corriente por PWM en el inversor.

III.- Operación "sin sensores".

Los sensores de posición proporcionan la información necesaria para que opere la máquina BLDC, pero a su vez representan un factor adicional de costo, y un posible punto débil en el sistema, ya que si fallan, o se interrumpen los cables que llevan las señales al controlador es imposible la operación de la máquina.

Adicionalmente, los sensores Hall tienen una temperatura límite de operación inferior a la del resto de los componentes de la máquina, los sensores ocupan espacio y, en las máquinas de baja potencia, el consumo de energía de los sensores reduce significativamente la eficiencia del actuador.

Para eliminar estos problemas se están proponiendo soluciones sin sensores de posición ("sensor-less") que buscan extraer la información necesaria para determinar la posición del rotor en base la contenida en las señales eléctricas del motor, medidas directamente en el inversor.

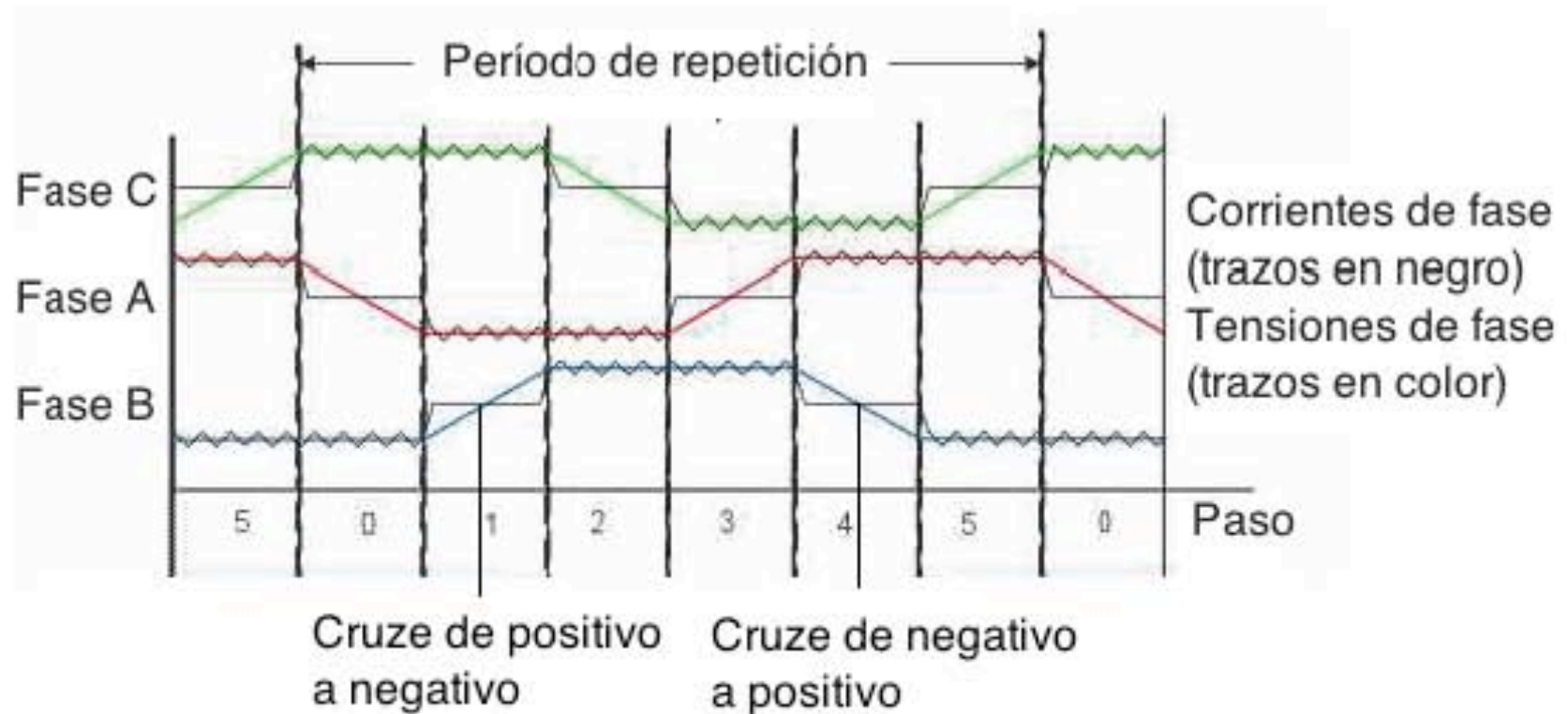
Esto reduce el cableado entre el controlador electrónico y la máquina BLDC al mínimo indispensable (los tres cables de la alimentación), reduce el volumen y el peso de la máquina y permite que opere en ambientes de mayor temperatura.

Hasta la fecha se han propuesto los siguientes métodos para determinar indirectamente la posición del rotor en la máquina BLDC:

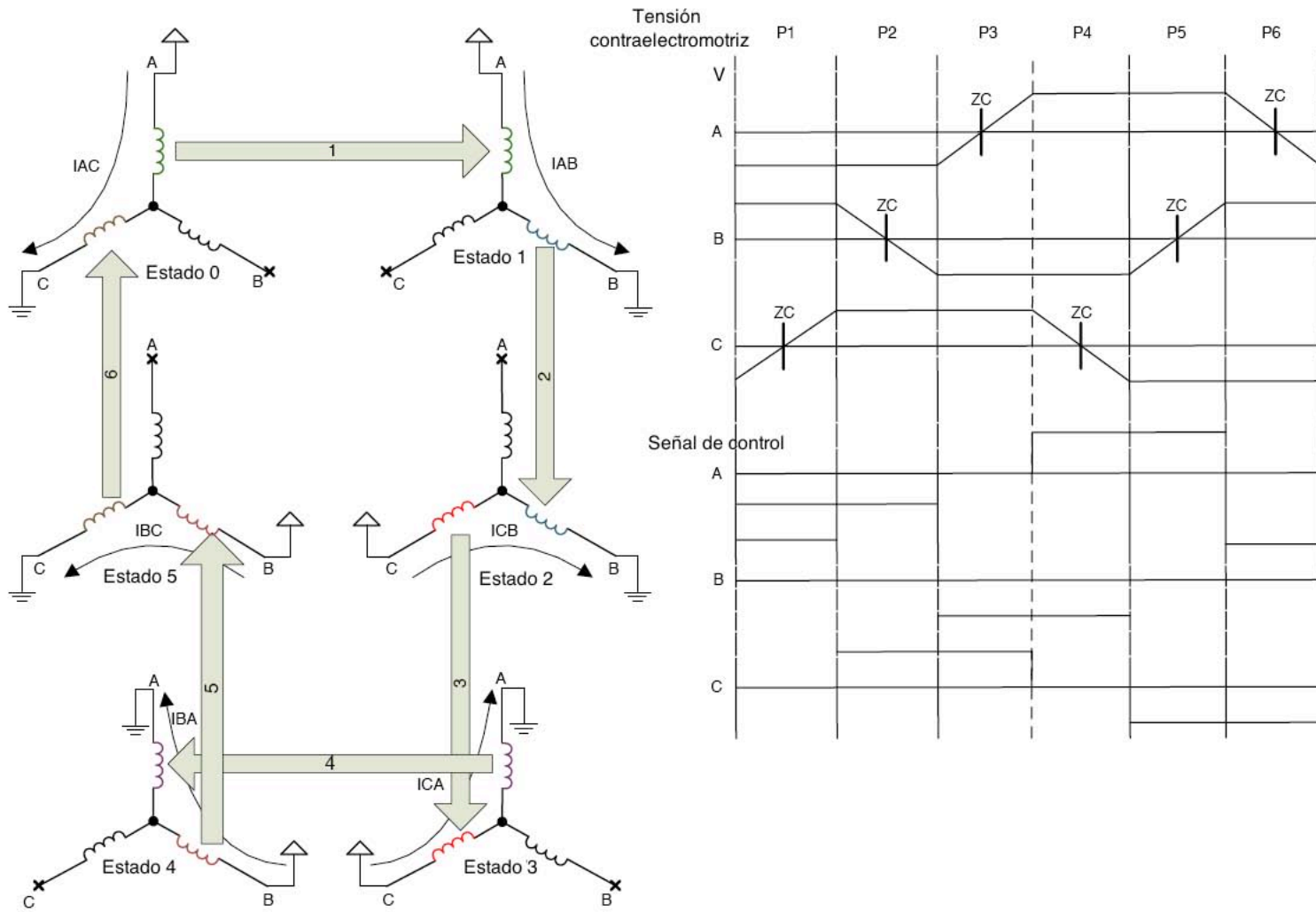
- 1.- Detectando el cruce por cero de la fuerza contra-electromotriz inducida en la fase que no está energizada.
- 2.- Detectando la tercera armónica de la fuerza contra-electromotriz inducida en la fase que no está energizada.
- 3.- Detectando las variaciones del valor de la inductancia en las fases.

Los dos primeros métodos se han aplicado a las máquinas BLDC con alimentación trapezoidal, los dos últimos se han aplicado a las máquina BLDC sincrónicas o con alimentación sinusoidal en las todas las fases.

Detección del cruce por cero de la tensión contra-electromotriz
den la fase no energizada.

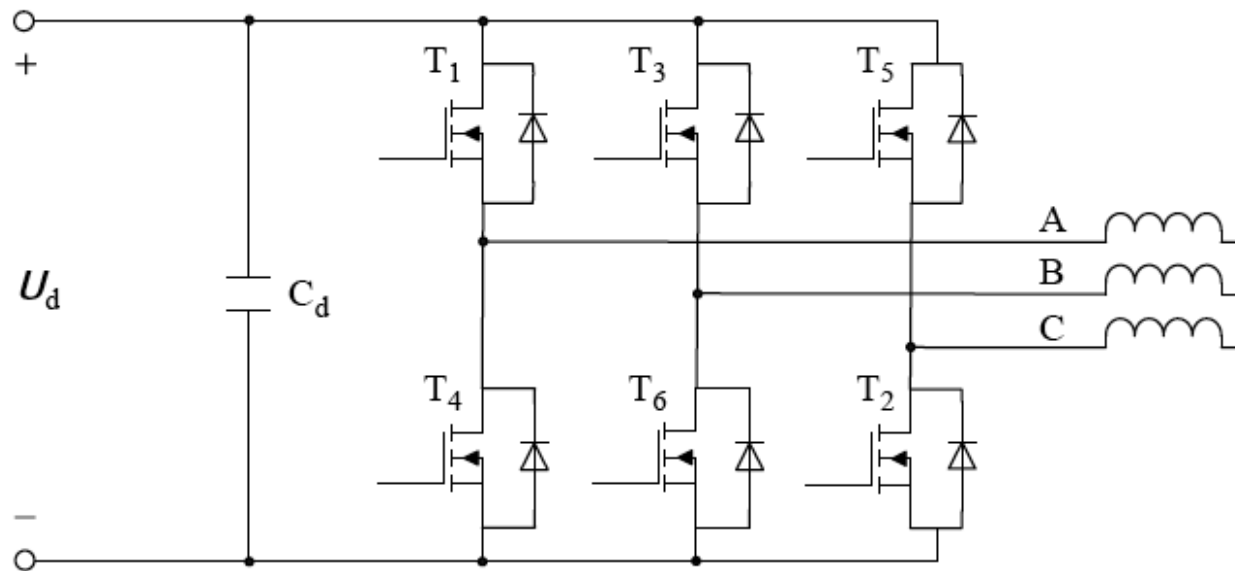


Cuando la fase se des-energiza su nivel empieza a cambiar. El valor cruza por cero en la mitad del intervalo no energizado.



Secuencia de estados de giro

El cambio al nuevo estado debe producirse medio ciclo después del cruce por cero. Este tiempo es, por supuesto, función de la frecuencia a la cual se está operando.



Dado que las bobinas de la máquina están conectadas en "Y" sin acceso al neutro no es posible medir directamente una tensión fase-neutro. Solo se pueden medir tensiones fase-fase, lo que requiere una manipulación adicional de las señales.

Suponiendo que la fase abierta es la A, se pueden realizar dos medidas:

$$v_{AB}(t) = v_{AN}(t) + v_{NB}(t)$$

$$v_{AC}(t) = v_{AN}(t) + v_{NC}(t)$$

Si además suponemos que las tres alimentaciones y las tres fases son idénticas, se debe cumplir en todo caso:

$$v_{NB}(t) = -v_{NC}(t)$$

Por lo tanto:

$$v_{AB}(t) + v_{AC}(t) = v_{AN}(t) + v_{NB}(t) + v_{AN}(t) + v_{NC}(t)$$

$$v_{AB}(t) + v_{AC}(t) = v_{AN}(t) + v_{NB}(t) + v_{AN}(t) - v_{NB}(t)$$

$$v_{AB}(t) + v_{AC}(t) = 2v_{AN}(t)$$

Esta señal tiene el mismo cruce por cero que la señal inicial, $v_{AN}(t)$.

Por supuesto estas ecuaciones son ideales; en la práctica siempre existirá ruido, incluyendo el generado por las conmutaciones del inversor, y existirán diferencias en las tensiones aplicadas en cada fase, debidas a las diferencias entre los componentes del puente, y entre las fases del motor.

IV.- Determinación de la posición inicial del motor BLDC controlado sin sensores de posición del rotor.

Un problema común a las tres alternativas de detección de la posición del rotor es la incertidumbre durante el encendido, dado que las tres estrategias dependen de la historia previa de operación.

En algunas aplicaciones simples (por ejemplo, el control del motor de una aspiradora), el arranque se resuelve aplicando una secuencia de pulsos de una duración predefinida, antes de emplear el algoritmo de detección de posición mas simple, el de cruces por cero.

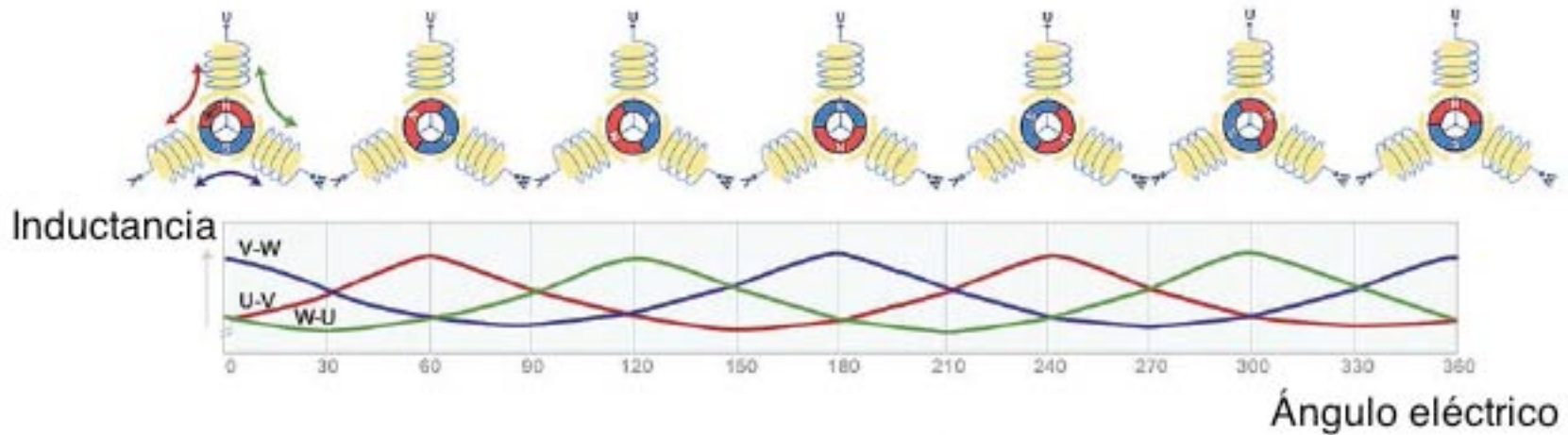
Si la aplicación es de alto rendimiento, la secuencia de arranque pre-determinado no es adecuada y es necesario por lo tanto un mecanismo auxiliar que permita determinar la posición inicial, cumpliendo con los siguientes requisitos:

- 1.- Evitar movimientos en sentido contrario al deseado.
- 2.- Lograr un arranque rápido y suave.
- 3.- Mantener limitada la corriente de arranque.

Los objetivos se pueden cumplir tomando en cuenta que:

1.- Las inductancias medidas entre los terminales de un motor BLDC depende de la posición del rotor, lo que modifica el perfil de crecimiento de la corriente cuando se aplica un pulso de tensión.

Esto determina la posición de los polos relativa a las fases. Pero no la polaridad de los mismos.



Valores de las inductancias en función del ángulo eléctrico.

2.- La suma del campo magnético del imán permanente y el generado por el pulso de corriente de prueba cuando las polaridades se complementan causa saturación en el material magnético, lo que reduce la impedancia efectiva.

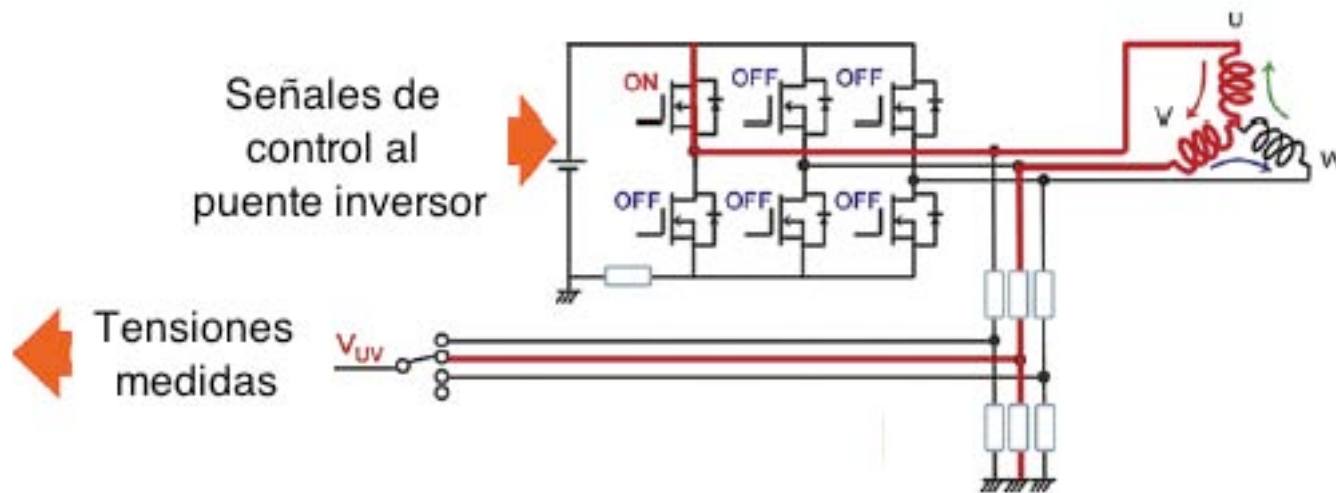
La combinación de los dos efectos permite determinar la posición exacta del rotor, y la secuencia de pulsos requerida para iniciar el movimiento en el sentido deseado.

El procedimiento es el siguiente:

Se energiza en secuencia cada una de las parejas de inductancias (U-V, V-W y W-U) y se mide el tiempo que la corriente tarda en alcanzar el valor de referencia prefijado.

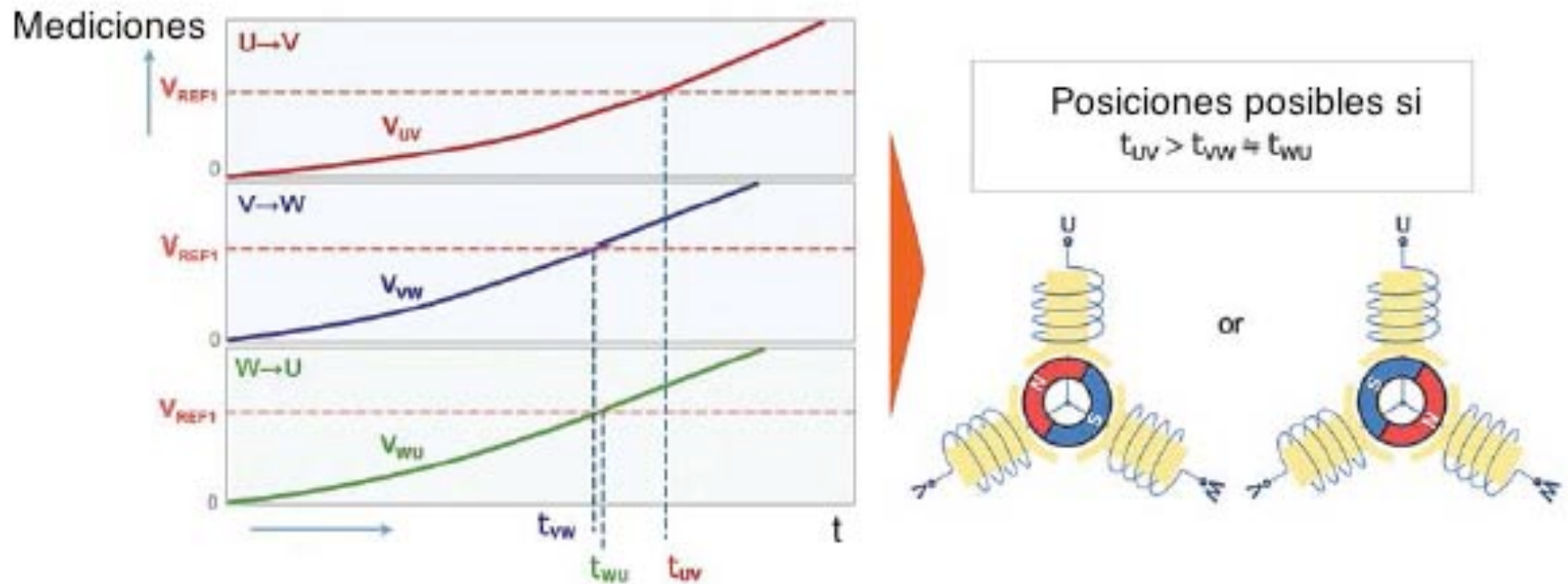
Se comparan los tiempos y el tiempo mas largo corresponde a la combinación de fases que no incluyen a la fase que está alineada con el rotor.

Por ejemplo, si $t_{uv} > t_{vw}$ y también $t_{uv} > t_{wu}$, entonces el rotor está alineado con la fase W.



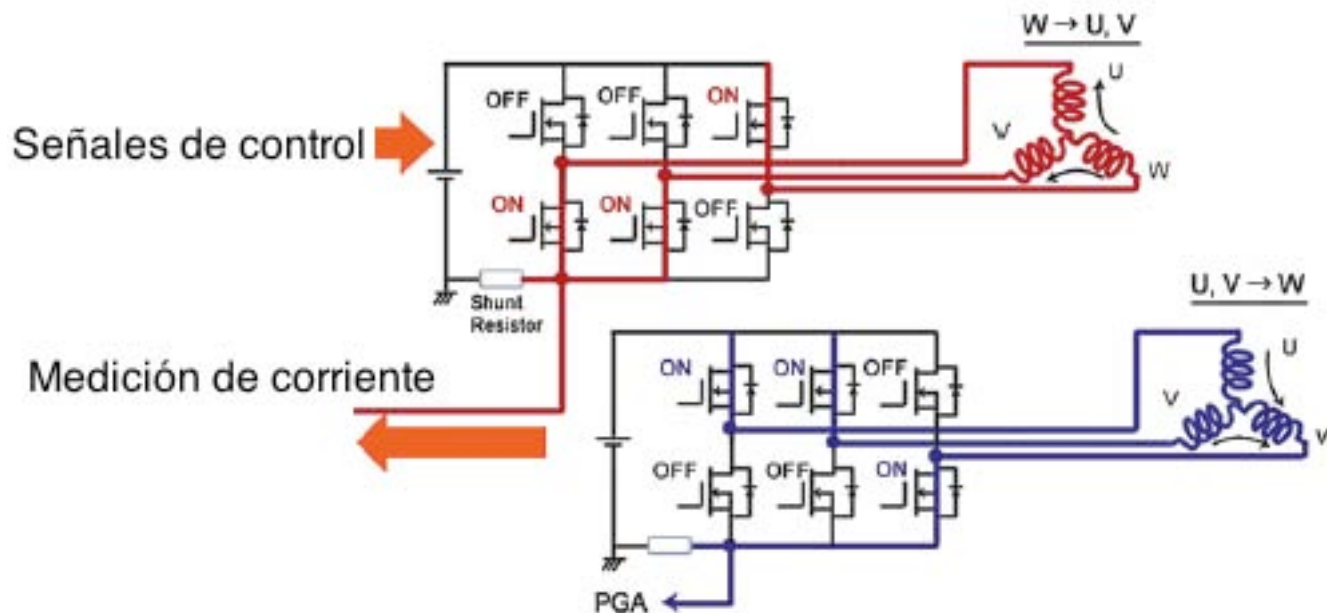
Esquema de mediciones a realizar en la primera etapa del procedimiento.

La información aún no es conclusiva porque puede ser el productor de dos alineaciones (norte-sur o sur-norte), separadas 180° eléctricos



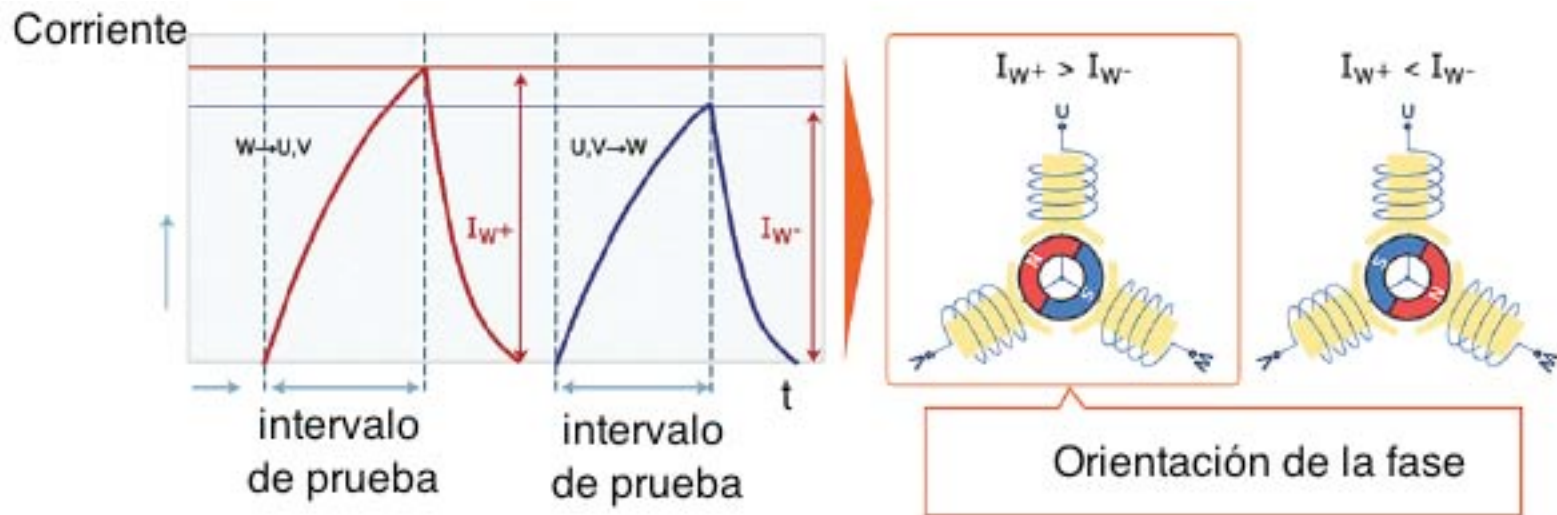
Resultados del primer conjunto de mediciones.

Para definir la orientación magnética del rotor se deben realizar dos pruebas adicionales, aplicando tensión en las dos polaridades a la fase alineada (W en este ejemplo) a través de la conexión en paralelo de las otras dos.



Configuración de prueba para definir la polaridad de la fase alineada.

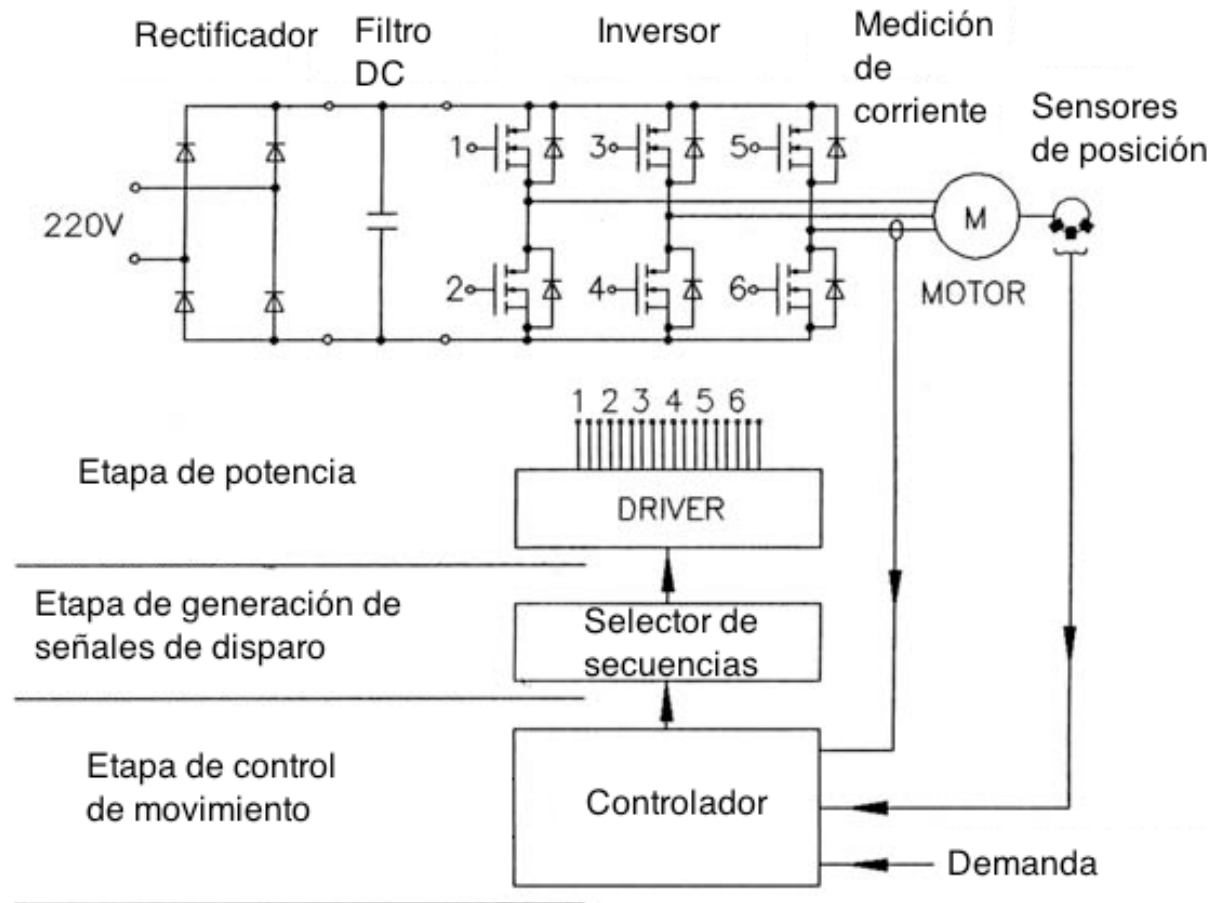
La relación de magnitud entre estas dos mediciones determina definitivamente la orientación del rotor.



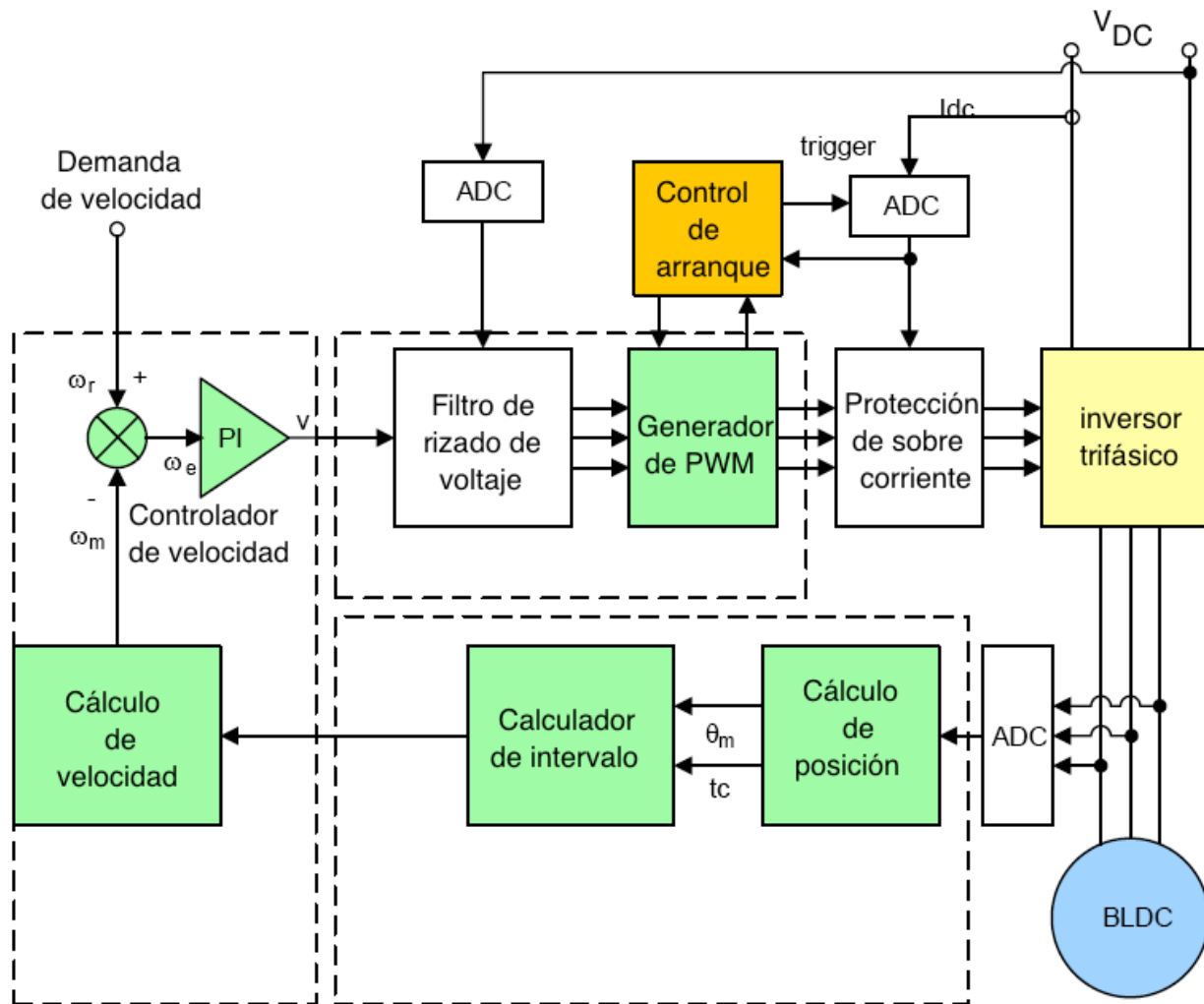
Continuando con el ejemplo, la figura muestra el resultado que se obtendría al alimentar la fase W con corriente positiva (gráfica marcada W-U,V) y con corriente negativa (gráfica marcada U,V-W) cuando el rotor está orientado con su polo Sur magnético en dirección a la fase W.

Si el rotor estuviese en la posición inversa (el polo Norte orientado en dirección a la fase W), el valor alcanzado por la corriente durante la prueba U,V-W hubiese sido superior al alcanzado durante la prueba W-U,V.

Las ventajas de este método de determinación de la posición inicial son su sencillez, ya que todo lo necesario forma parte de la configuración básica de actuador, la rapidez, ya que los tiempos de prueba pueden ser muy cortos, y la imposibilidad de que el motor se desplace durante el tiempo de prueba, ya que las corrientes de prueba son muy pequeñas.



Estructura general de los sistemas controladores de posición/velocidad/aceleración basados en un BLDC con sensores de posición del rotor para aplicaciones de baja potencia

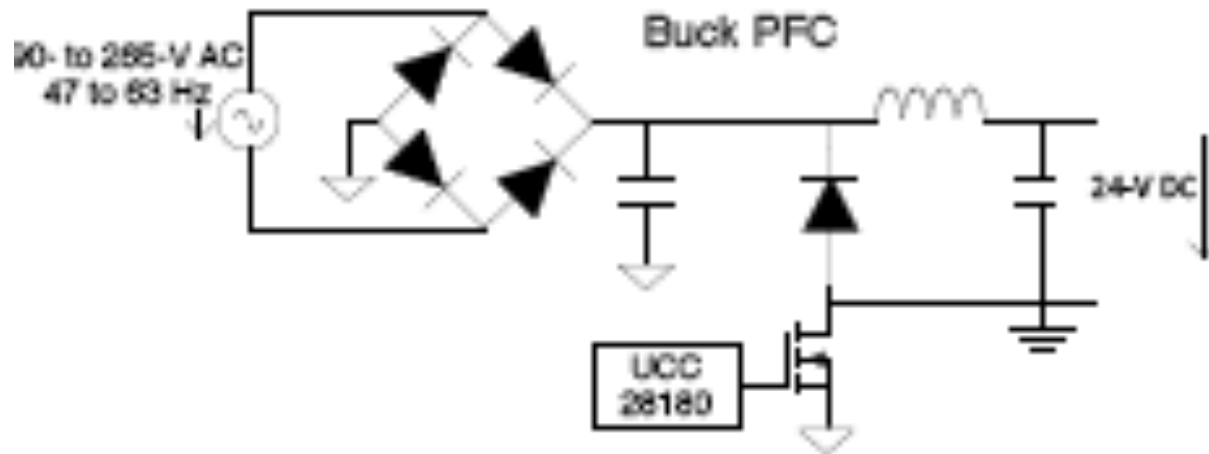


Estructura general de los sistemas controladores de posición/velocidad/aceleración basados en un BLDC sin sensores.

En las aplicaciones de potencia media-alta la estructura general es equivalente, reemplazando el puente rectificador no controlado monofásico por uno trifásico, e incluyendo una etapa de disipación de la energía recuperada durante el frenado regenerativo.

El uso de rectificadores no controlados, común hasta la fecha, inyecta un nivel considerable de armónicas en la línea, contaminándola y reduciendo el factor de potencia del equipo.

Para las configuraciones de baja potencia, en las cuales no resulta rentable tratar de regenerar a la línea la energía recuperada por frenado regenerativo del motor, el problema de la inyección armónica se controla incluyendo una etapa de corrección del factor de potencia (PFC) entre el rectificador y el filtro capacitivo.



Para las aplicaciones de media-alta potencia, donde la recuperación a la línea de la energía producto del frenado regenerativo sea conveniente el rectificador no controlado debe ser reemplazado por un rectificador completamente controlado, por conmutación forzada (un “rectificador vectorial”).

Implementación del controlador del motor BLDC

En el mercado está disponible un número de circuitos integrados que integran diversas funciones relacionadas con el control de motores BLDC; algunos (ejemplo MC33035, A4960, etc.) son casi totalmente auto-contenidos e integran las funciones de detección de la posición del rotor y de generación de los correspondientes pulsos de disparo, pero no la etapa del conversor de potencia, lo que permite que el ingeniero de diseño ajustar dicha etapa a los requerimientos exactos del motor.

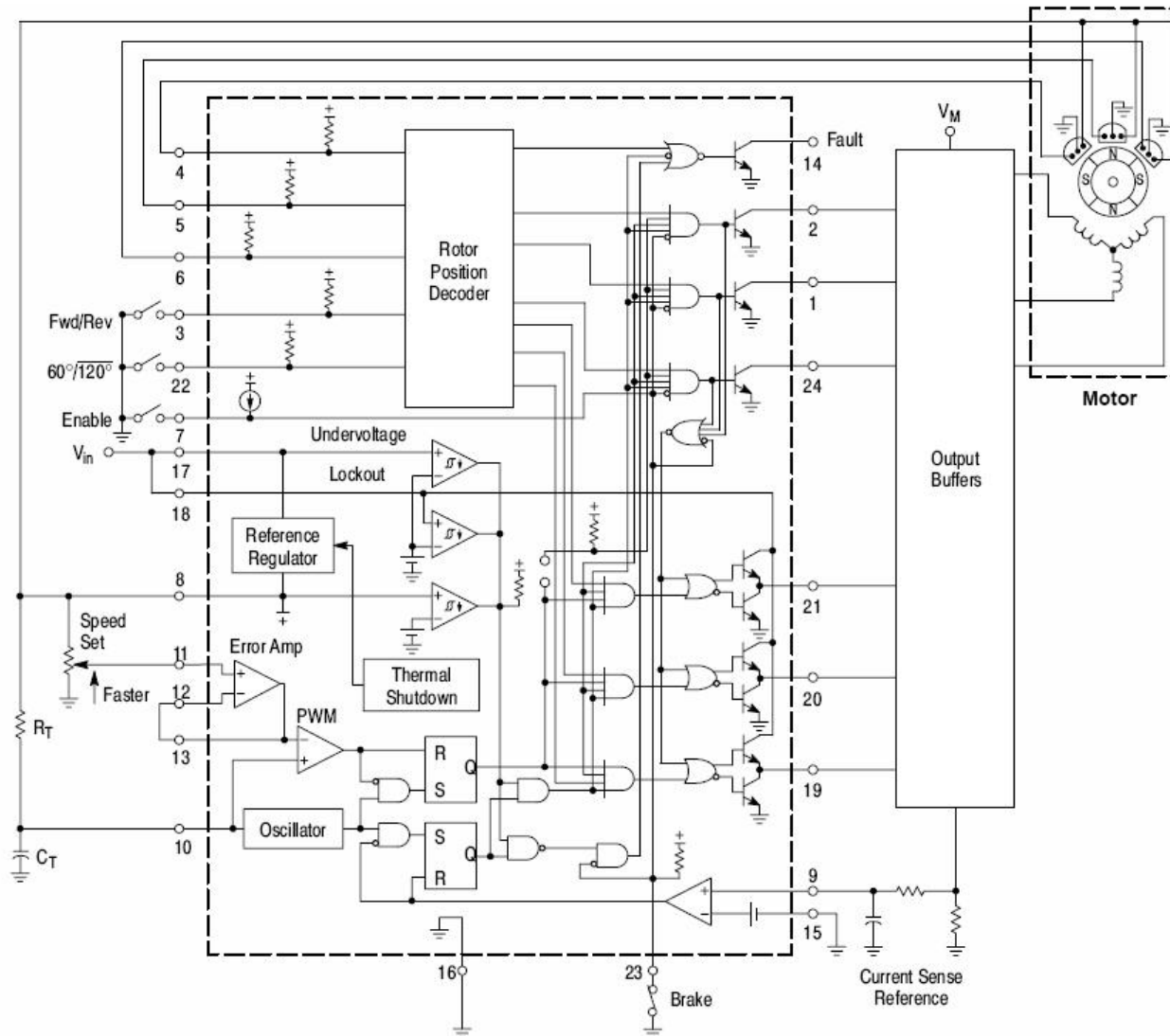
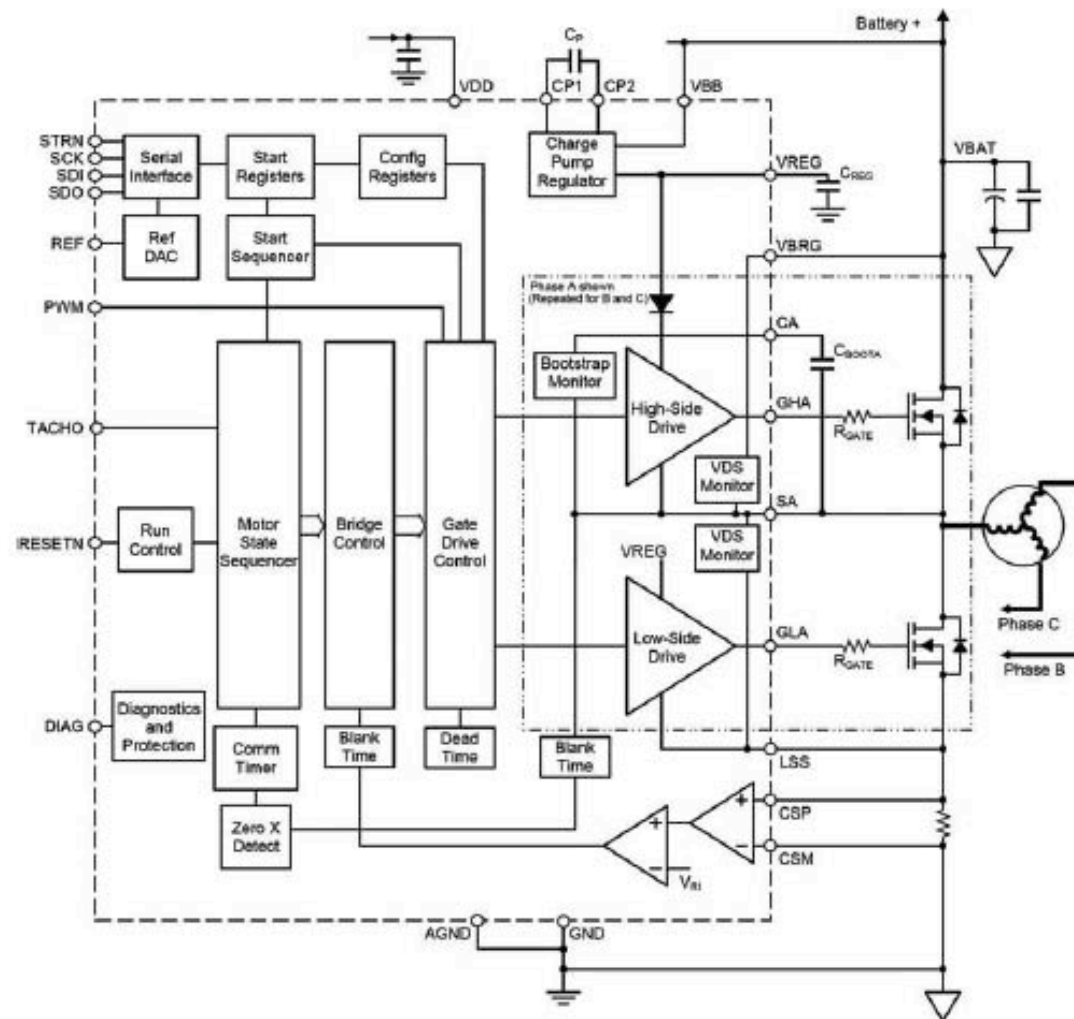


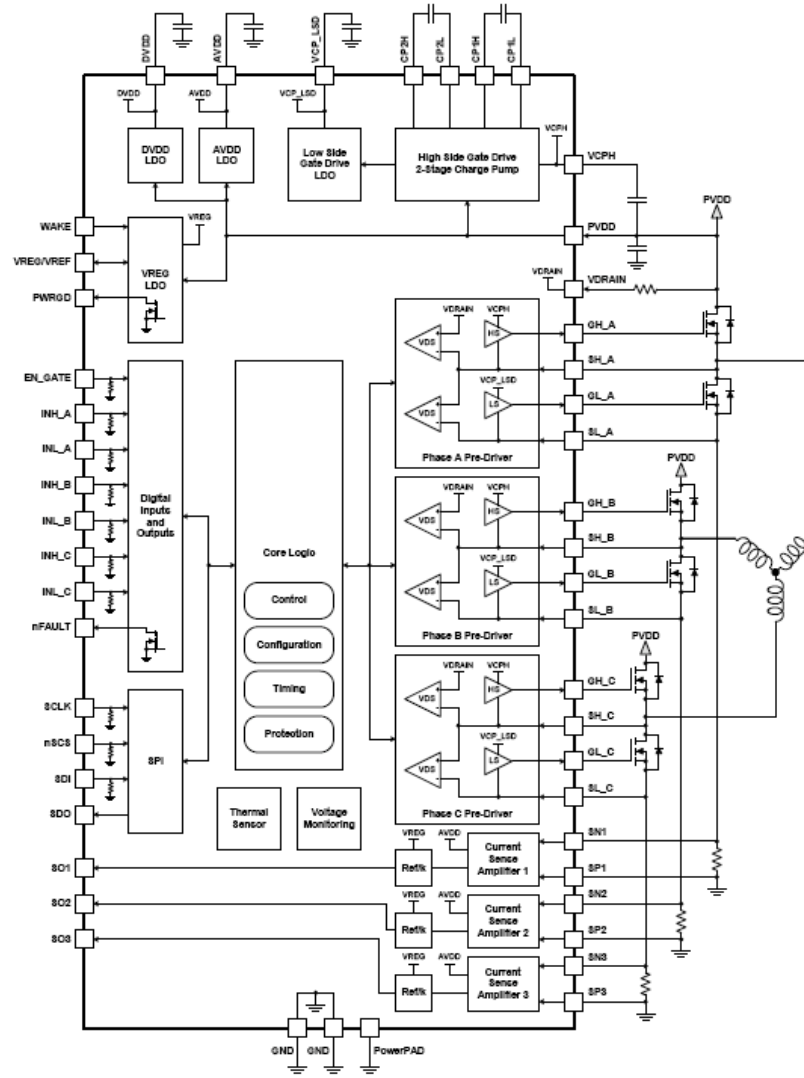
Diagrama de bloques MC33055

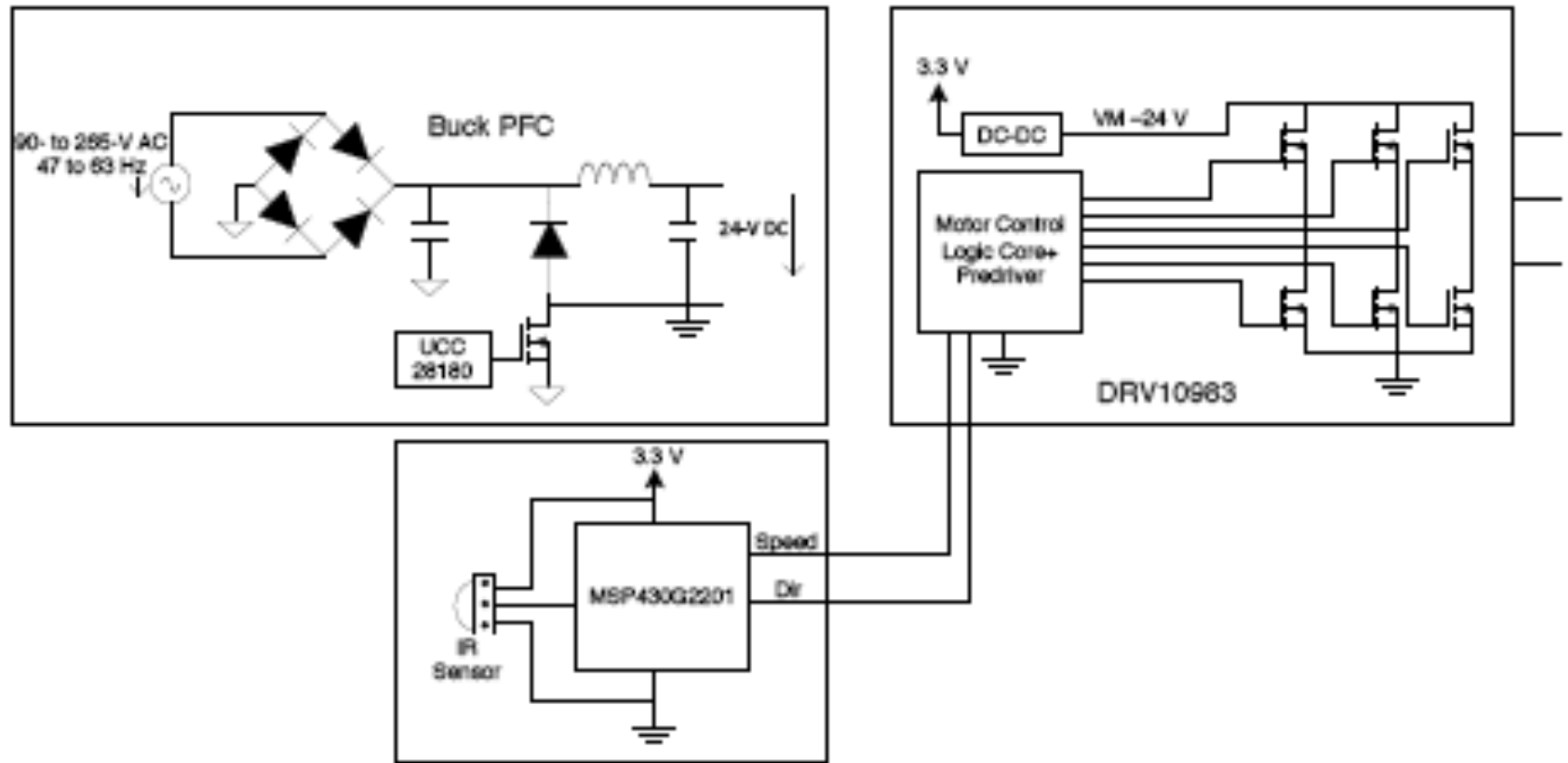


Controlador A4960, cortesía Allegro Microsystems.

Otros fabricantes prefieren una topología mas abierta, en la que una parte importante de las funciones está implementada con un microcontrolador apoyado por C.I. dedicados como el DRV8305.

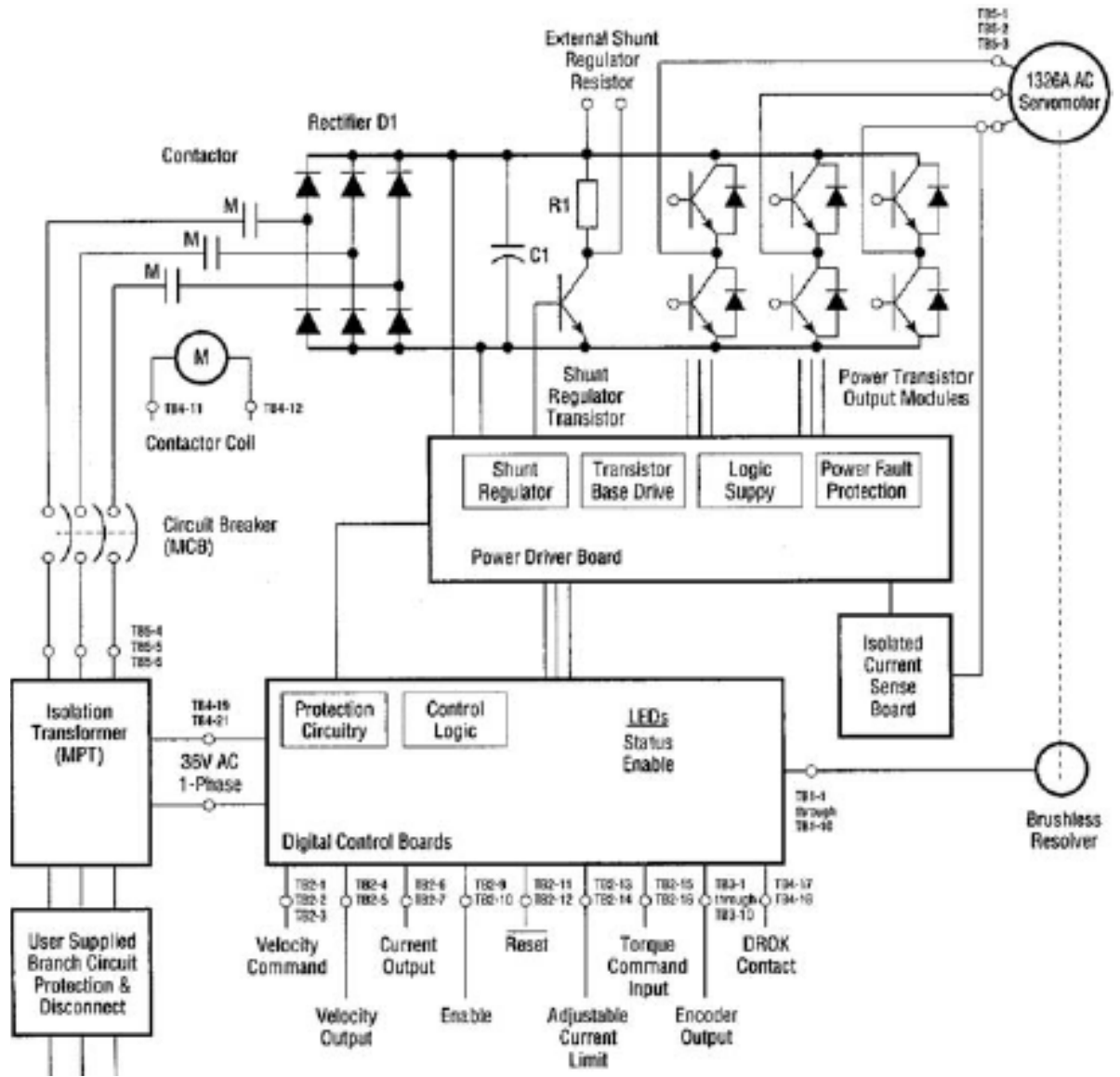
DRV8305





Estructura de control para motor BDLC propuesta por Texas Instruments.

Y fabricantes de equipos completos, recurren a configuraciones que usan una combinación de tarjetas especializadas y tarjetas de propósitos generales (ejemplo: Allen-Bradley)



Actuador con motor BLDC.

El conjunto motor BLDC con su actuador electrónico, tanto en las versiones con sensores de posición o "sensorless" pueden reemplazar completamente al conjunto actuador DC/DC motor DC de imán permanente en el esquema de desarrollo de un controlador de posición, velocidad y aceleración desarrollado siguiendo las pautas presentadas en el capítulo anterior; el reemplazo es "1 a 1", aunque puede ser necesario por supuesto ajustar las ganancias para tener en cuenta las características de transferencia específicas del nuevo conjunto actuador-motor.