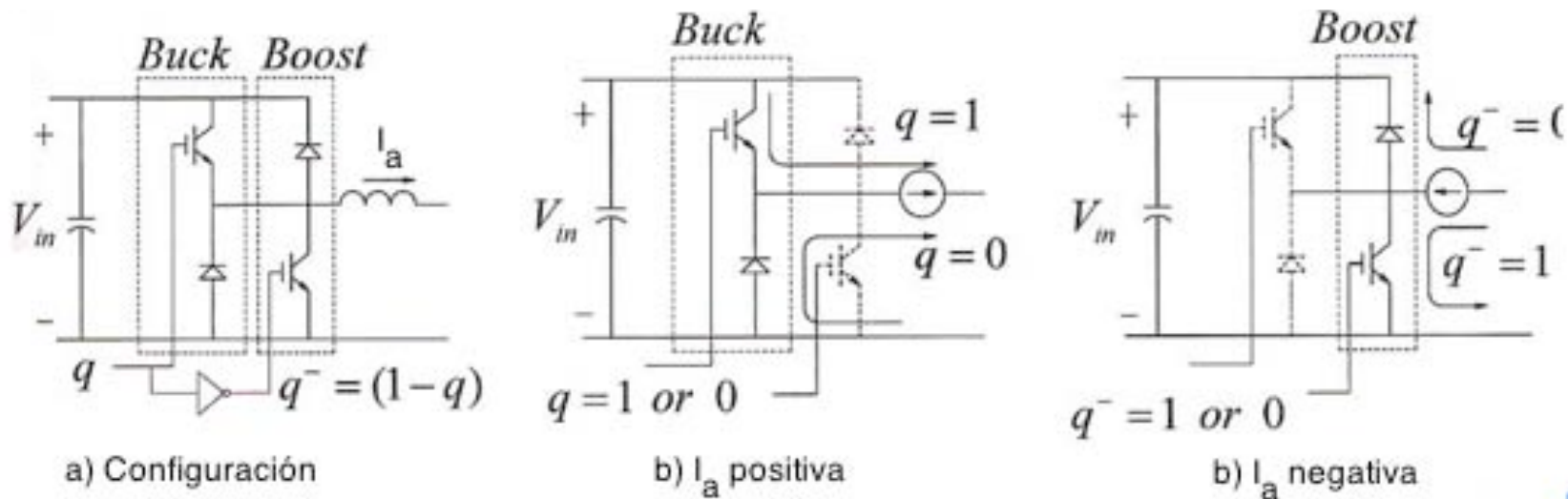


Actuador elevador-reductor de dos cuadrantes para cargas tipo máquina DC.

Si se desea acelerar y frenar con recuperación de energía una carga tipo máquina DC que opera sin cambio de dirección de giro, es necesario emplear una combinación formada por un convertor DC-DC tipo reductor de tensión para operar la máquina en el primer cuadrante (cuadrante motriz) y un convertor DC-DC tipo elevador de tensión para operar la máquina en el segundo cuadrante (cuadrante de frenado).

Esta configuración convertora se conoce como convertor medio puente.



Conversor DC-DC reductor-elevador (medio puente)

a) Configuración en base a los dos conversores básicos, indicando la relación entre las variables de control de los conmutadores

b) Operación en el ciclo de entrega de energía a la carga.

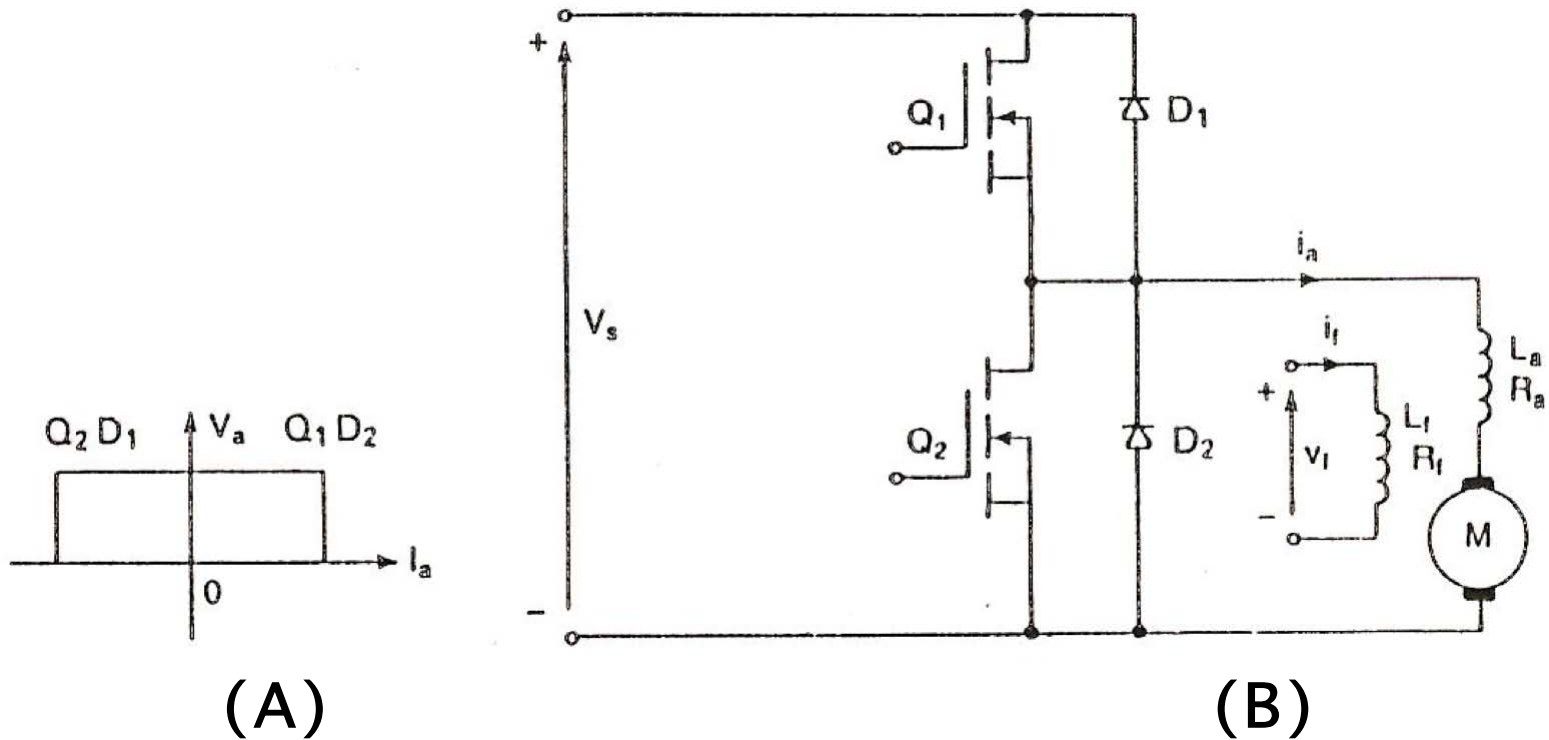
c) Operación en el ciclo de recuperación de energía de la carga.

Para evitar cortocircuitar la fuente de entrada, V_{in} , es preciso asegurar que los dos conmutadores controlados nunca estén encendidos simultáneamente.

En principio es aceptable que ambos conmutadores controlados estén apagados simultáneamente, pero este estado de reposo no es imprescindible para analizar la operación del conversor.

Por lo tanto durante la operación del sistema lo más conveniente por seguridad es que la señal de control de uno de los dos conmutadores controlados sea la versión negada de la señal de control aplicada al otro conmutador controlado.

En general es costumbre considerar que la señal de control única, q , se aplica directamente al conmutador que ejecuta la función de conversión reductora (actuador motriz), y la señal negada de esta, q^- , es la que se aplica al conmutador que ejecuta la función de conmutación elevadora (actuador de frenado).



Convertidor DC-DC de dos cuadrantes reductor-elevador de tensión (convertidor medio puente) configurado como actuador de una máquina DC.

(A) Cuadrantes de operación
(B) Circuito

En esta configuración el regulador entrega energía a la máquina cuando esta opera como motor y recibe energía de la máquina cuando esta actúa como generador para devolverla a la fuente durante los intervalos de frenado regenerativo.

En la conexión mostrada en la figura el convertidor elevador reductor opera en los cuadrantes I (cuadrante motriz), entregando energía de la fuente externa a la máquina DC, que opera como motor, y en el cuadrante II (cuadrante de frenado regenerativo), extrayendo energía de la máquina DC, que opera como generador, y entregándosela a la fuente externa.

Mientras el convertidor medio puente opera como elevador, se aplican las ecuaciones del convertidor elevador básico.

De la misma manera, cuando opera como reductor, su comportamiento esta definido por las ecuaciones desarrolladas para la configuración reductora básica.

Para simplificar el control del medio puente se usa una sola sola señal de control "q" binaria que se aplica en directo a uno de los dos conmutadores controlados y en negado otro.

De esta manera, si se opera con un período de repetición T constante (esto es, con una frecuencia de conmutación $f = \frac{1}{T}$ constante), y cada ciclo de trabajo se divide en dos intervalos que cumplen con:

$$t_1 + t_2 = T$$

$$t_1 = kT$$

$$t_2 = (1 - k)T$$

Usualmente se asigna $q=1$ durante el intervalo t_1 , y cero durante el intervalo t_2 . Esto hace que el control con lógica positiva sea el aplicado al convertidor reductor o convertidor de arranque.

El ciclo de operación, partiendo del reposo es el siguiente, operando preferentemente en el modo control de corriente:

1.- Arranque y aceleración : Se activa el convertidor aplicando el pulso de disparo al conmutador reductor, y se ajusta el ciclo de trabajo para producir la corriente de aceleración deseada, aplicando el par de arranque requerido. Esto aumenta la energía mecánica almacenada en la carga.

2.- Operación a velocidad constante: Se ajusta el ciclo de trabajo para que el par motriz sea igual al par de oposición, lo que mantiene la velocidad constante. Al no haber cambios en la velocidad la energía cinética almacenada en la carga permanece constante; la energía potencial puede seguir variando de acuerdo con el perfil de la trayectoria.

3.- Inicio de frenado: Se reduce la tensión positiva para que la corriente circulante baje a cero lo más rápidamente posible. Esto elimina el par motriz, pero la máquina sigue girando en la misma dirección, impulsada por la energía cinética almacenada en la carga (el efecto de la energía potencial depende de la trayectoria, no de la acción del controlador) y $E(\omega)$ no cambia su polaridad.

4.- Frenado activo: Como la corriente ahora está impulsada por la fuente $E(\omega)$ al aumentar ahora el ciclo de trabajo el convertidor necesariamente opera como elevador (la corriente ahora solo puede ser entrante); regulando el ciclo de trabajo se controla la intensidad de la corriente y con ella la del par de frenado.

Se recupera energía reduciendo la energía cinética acumulada anteriormente en la carga. Adicionalmente hay recuperación de energía potencial si la trayectoria es descendente durante el frenado. Si la trayectoria es ascendente, el aumento de la energía potencial ocurre a partir de una reducción adicional de la energía cinética (frenar cuesta arriba es mas fácil).

5.- Fin del frenado: cuando la velocidad se reduce hasta el valor deseado se reduce el ciclo de trabajo hasta 0, lo que elimina la circulación de corriente de armadura en el sentido de recuperación de energía (entrando al convertidor).

6.-Nuevo ciclo: Si al final del período de frenado la velocidad es cero, el nuevo ciclo solo puede ser iniciado con una etapa de aceleración, ya que $E(\omega)$ es cero en esta condición. Si la velocidad no es cero al final de la etapa de frenado, se cumple $E(\omega) > 0$, lo que permite dos alternativas:

A.- Se activa el convertidor con un k que produce la condición $V_{DC} > E(\omega)$. Esto hace que circule corriente saliente del convertidor a la máquina, y se inicia una nueva etapa de aceleración.

B.- Se activa el conversor con un k que produce la condición $V_{DC} < E(\omega)$. Esto hace que circule corriente entrante, de la máquina al conversor, y se inicia una nueva etapa de frenado.

Por supuesto el razonamiento anterior presupone que la fuente de alimentación debe ser capaz de aceptar toda la energía regenerada durante el frenado.

Si esto no es posible, el exceso de energía regenerada que no puede ser aceptada por la fuente debe ser disipada en una resistencia de frenado auxiliar. Esto, por ejemplo, puede ocurrir en un vehículo eléctrico cuando la batería se ha cargado al máximo antes de concluir el frenado.

Desde el punto de vista operativo, alimentar un motor DC con un conversor DC/DC reductor-elevador es equivalente a alimentarlo con un arreglo formado por un rectificador completamente controlado AC/DC y el conjunto de contactores electromecánicos requeridos para invertir la conexión entre la armadura del motor y el conversor, con la ventaja de que la respuesta del conversor DC/DC es mucho más rápida, ya que el conversor AC/DC tarda un ciclo de línea (16,6ms) en alcanzar la tensión de salida deseada, y a eso hay que sumarle el retardo de los contactores electromecánicos, mientras que el conversor DC/DC tarda solo un tiempo igual a un ciclo de la frecuencia de conmutación (100micros si la frecuencia de conmutación es 10kHz) en cambiar su tensión de salida al nuevo valor deseado.

Si las conexiones entre el motor y el convertidor medio puente de dos cuadrantes se invierten, el sistema queda preparado para que en el siguiente ciclo de operaciones pase a operar con la máquina DC girando en sentido contrario en los cuadrantes III (motriz) y IV (frenado regenerativo).

Estos cambios se pueden hacer manualmente o por medio de un juego de contactores electromecánicos como el presentado en la configuración convertidor AC/DC completamente controlado con arreglo de contactores en el circuito de armadura.

Usualmente, por razones de seguridad, el control de los contactores para cambiar la dirección de viaje no es automático y solo puede ser iniciado por el operador/conductor cuando la máquina está completamente detenida

El uso de convertidores medio puente y un arreglo de contactores para permitir operar en los dos sentidos de giro es típico por razones de costo y seguridad en los vehículos de tracción eléctrica DC de tránsito urbano (metros y tranvías) que realizan sus rutas de ida y vuelta (usualmente largas) cambiando la dirección de marcha al llegar a cada estación terminal.

Si la máquina DC es de campo bobinado con alimentación independiente, el paso de operar en los cuadrantes I-II a operar en los cuadrantes III-IV se puede hacer también invirtiendo el sentido de la corriente de campo.

Actuador de cuatros cuadrantes para cargas tipo máquina DC.

Si se desea acelerar y frenar con recuperación de energía en ambas direcciones una carga tipo máquina DC con la máxima velocidad posible, es necesario emplear una combinación formada por dos conversores DC-DC de dos cuadrantes (convertor reductor-elevador).

Esta configuración convertora DC-DC de cuatro cuadrantes se conoce generalmente como convertor “Puente H” o puente completo.

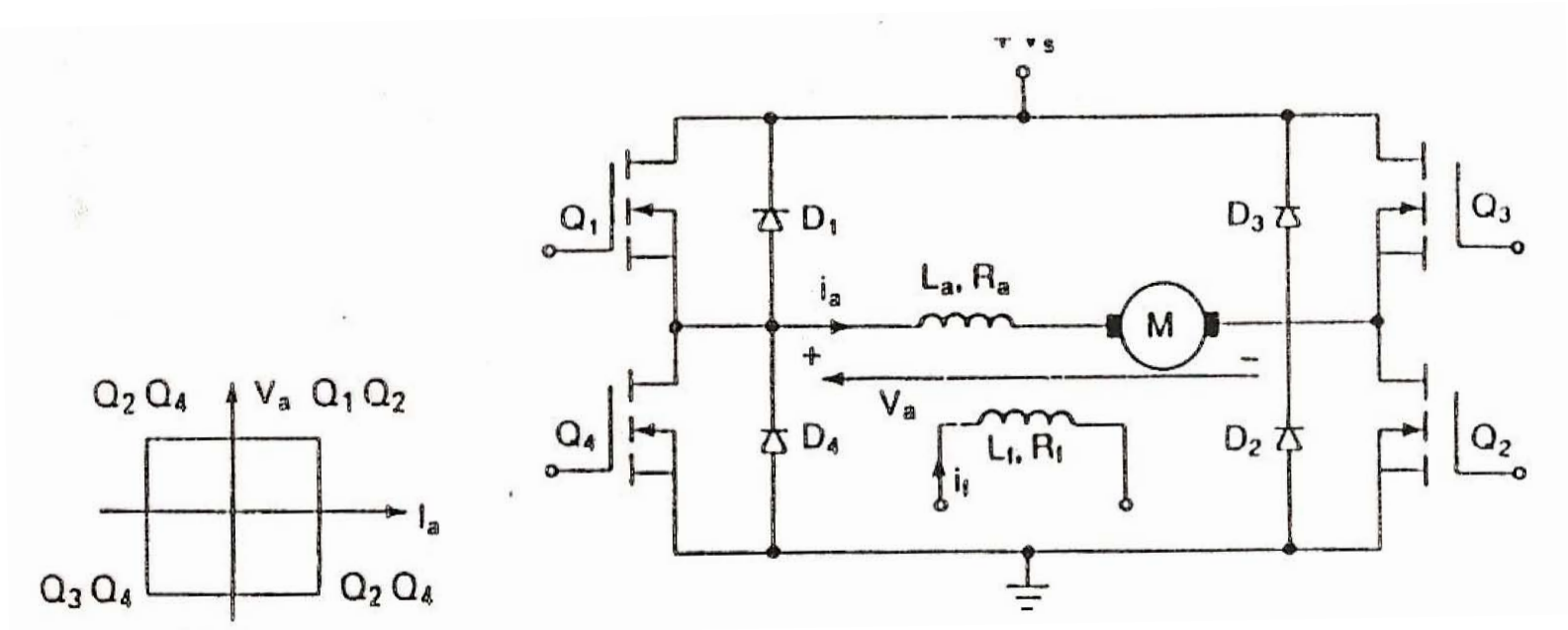
Desde el punto de vista operativo manejar un motor DC con un conversor DC/DC tipo puente H es funcionalmente equivalente a manejarlo con un arreglo anti-paralelo de dos conversores AC/DC completamente controlados con corriente circulante, con la ventaja de que la velocidad de respuesta del puente H es significativamente mas alta, ya que la tensión de salida de un conversor AC/DC trifásico alcanzar la nueva tensión de armadura tarda un ciclo de línea ciclo de línea, esto es el retardo de respuesta en el peor caso es de 16,6 ms, mientras que en un puente H el retardo en el peor caso es del orden del inverso de la frecuencia de conmutación (100 micros si la frecuencia de conmutación es 10 kHz).

Cuando se emplea como actuador para una máquina DC el regulador elevador-reductor de cuatro cuadrantes cumple dos funciones:

1.- Se encarga de suministrar la tensión de operación a la máquina cuando opera como motor en el primer o tercer cuadrante.

2.- Se encarga de suministrar la tensión de frenado a la máquina cuando esta opera como generador en el segundo o cuarto cuadrante.

En esta configuración el regulador entrega energía a la máquina cuando esta opera como motor y recibe energía de la máquina cuando esta actúa como generador para devolverla a la fuente durante los intervalos de frenado regenerativo.



(A)

(B)

Convertor DC-DC de cuatro cuadrantes (“Puente H”) de tensión configurado como actuador de una máquina DC.

(A) Cuadrantes de operación

(B) Circuito

Las restricciones de seguridad en este circuito son equivalentes a la indicada para el convertidor medio puente.

Para evitar cortocircuitar a la fuente V_s , los conmutadores Q_1 y Q_4 no pueden estar simultáneamente encendidos, y lo mismo ocurre con los transistores Q_2 y Q_3 , por lo que, por razones de seguridad, es conveniente que la señal de control de Q_4 sea el negado de la de Q_1 , y la de Q_3 el negado de la de Q_2 .

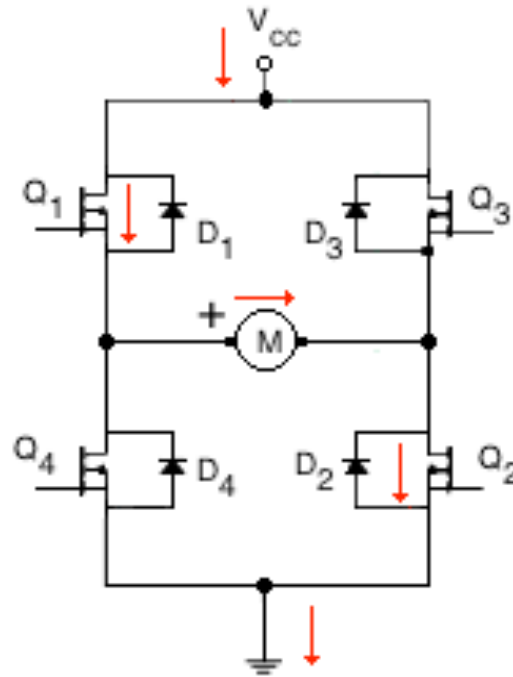
Modos de operación.

El primer paso es seleccionar la dirección de movimiento, lo cual requiere seleccionar si el sistema se inicia encendiendo primero la diagonal 1-2 o la diagonal 3-4.

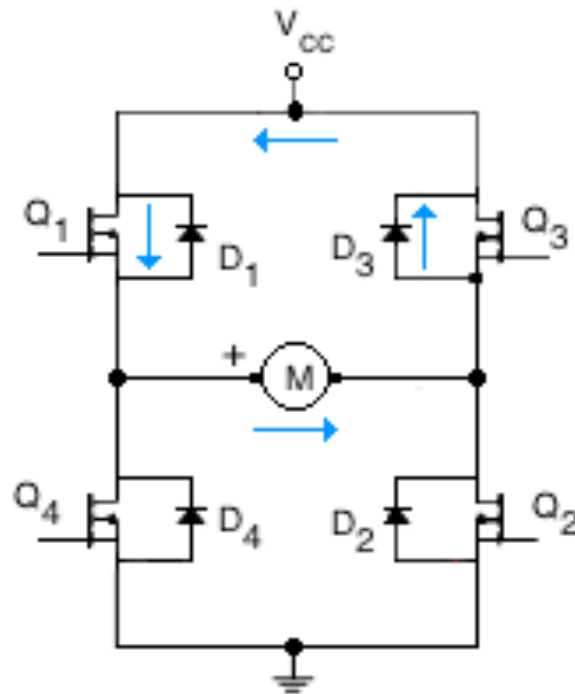
Seleccionado esto, el sistema está listo para arrancar a operar en uno de los dos cuadrantes motrices. Para la discusión que sigue se asume que se empieza a operar energizando la diagonal 1-2.

I.- En el cuadrante I (motriz).

Asumiendo que la operación en el cuadrante I corresponde a las polaridades de corriente y tensión de armadura mostradas en la figura, la operación en este cuadrante requiere encender la diagonal Q_1 - Q_2 , alimentando corriente a la armadura de la máquina.



Una vez alcanzado el valor pico deseado en la corriente, si se trabaja en control de corriente, o transcurrido el tiempo precalculado t_{on} , si se trabaja en control de voltaje, se apaga uno de los conmutadores controlados de esta diagonal, por ejemplo Q2, con lo que la corriente se transfiere de este al diodo D₃.



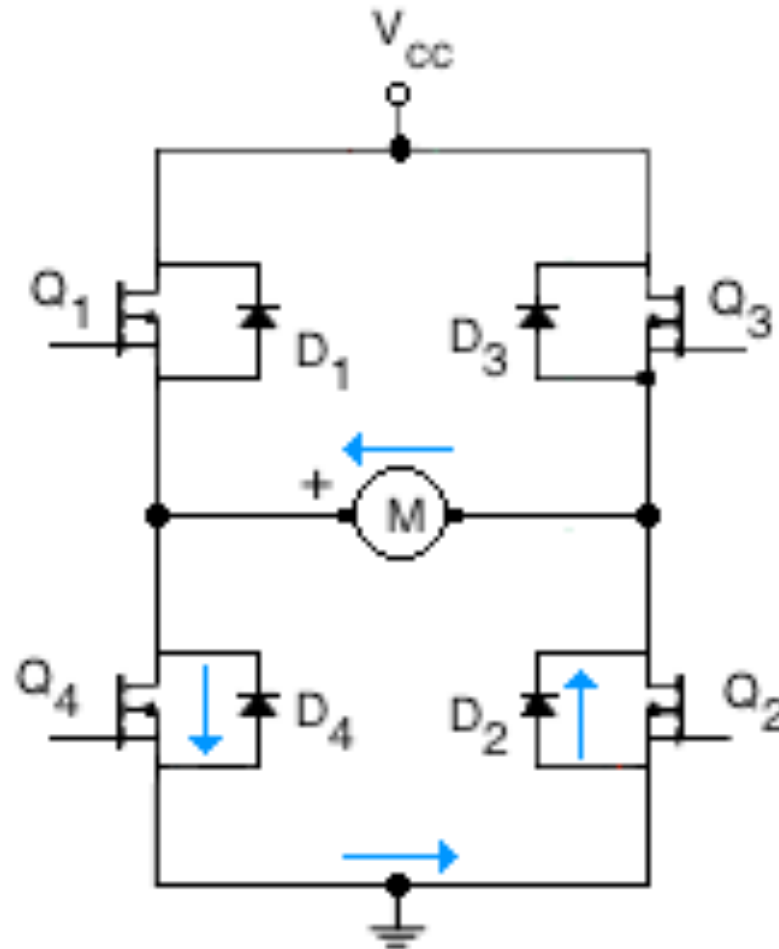
La corriente de armadura circula en un lazo cerrado, la tensión externa es cero, y la corriente se reduce.

Cuando la corriente alcanza su valor mínimo, si se opera en control de corriente, o transcurrido el tiempo de ciclo T , si se trabaja en control de voltaje, se vuelve a encender $Q2$ y el ciclo se repite

Mientras la corriente de armadura es positiva la aplicación de las respectivas señales de encendido a los conmutadores de la diagonal Q_4 - Q_3 no produce efecto, ya que la conducción de los diodos D_4 - D_3 mantiene a los conmutadores Q_4 - Q_3 polarizados en inverso, impidiendo que conduzcan.

Por supuesto, si estando detenido el motor se inicia la operación con la diagonal Q_4 - Q_3 el arranque es en sentido contrario.

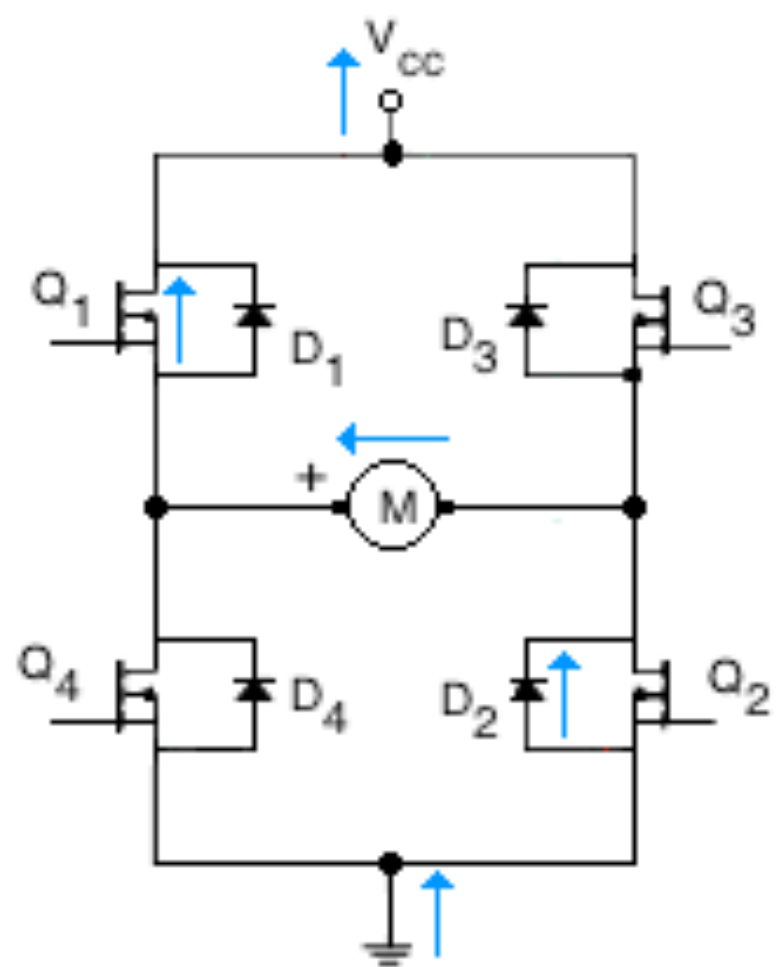
II.- En el cuadrante II (frenado).



Una vez que la corriente de armadura positiva se ha hecho cero, el proceso de frenado se inicia aplicando las señales de encendido a los conmutadores Q₄-Q₂.

Esto hace que la corriente circule en el lazo cerrado armadura- Q_4 - D_2 , el conmutador Q_2 queda polarizado en inverso, y la corriente empieza a crecer impulsada por la fuerza contraelectromotriz del motor, que sigue girando en la misma dirección.

Una vez que la corriente de almacenamiento de energía de frenado alcanza el valor deseado, se apaga Q_4 , manteniendo encendido Q_2 , lo que fuerza a la corriente que circulaba a través de este conmutador a transferirse al diodo D_1 .



La corriente circula ahora en el circuito armadura- D_1 - V_s - D_2 , entrando por el terminal positivo de la fuente y, por lo tanto, transfiriendo energía de la máquina eléctrica a la fuente externa, y la corriente en la armadura se reduce. En este intervalo se está aplicando señal de encendido a Q_1 , pero este no puede entrar en conducción porque está polarizado en inverso por el diodo D_1 .

Cuando la corriente de armadura alcanza el valor mínimo deseado, se enciende Q_4 , y se inicia un nuevo pulso de frenado.

III.- En el cuadrante III (motriz).

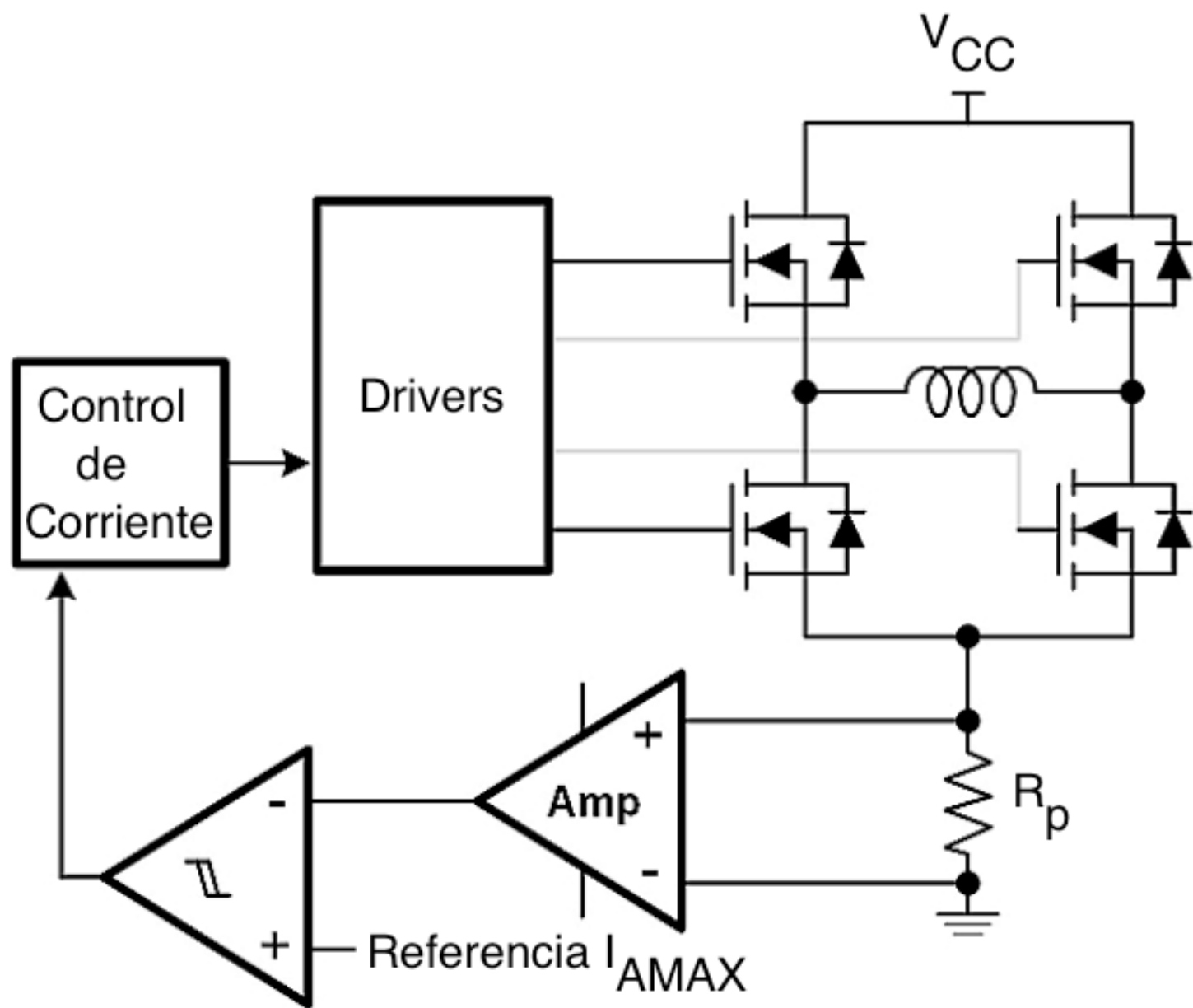
La operación es equivalente a la descrita para el cuadrante I, con los conmutadores Q_3 - Q_4 activados en vez de Q_1 - Q_2 para iniciar el ciclo.

IV.- En el cuadrante IV (frenado).

La operación es equivalente a la descrita para el cuadrante II, con los conmutadores Q_1 - Q_3 activados en vez de Q_2 - Q_4 para iniciar el ciclo.

El arranque del motor con carga inercial o con rotor bloqueado en caso de falla mecánica produce sobrecorrientes de arranque muy elevadas.

Para evitar esto es preciso incluir un sistema limitador de la corriente de armadura, preferiblemente capaz de actuar en forma independiente del sistema de generación de PWM, y con autoridad para interrumpir la aplicación de la tensión en el instante que se detecte la sobre-corriente.



La resistencia de muestreo de corriente por supuesto puede reemplazarse por cualquier otro sensor de corriente, y su señal puede ser compartida con el sistema de control del actuador.

En el mercado se ofrecen circuitos integrados especializados para cumplir las funciones de controladores (“drivers”) para puentes H aplicados al control de motores DC con escobillas de baja potencia; un ejemplo típico es el DRV8701 de Texas Instruments.

Simplified System Block Diagram

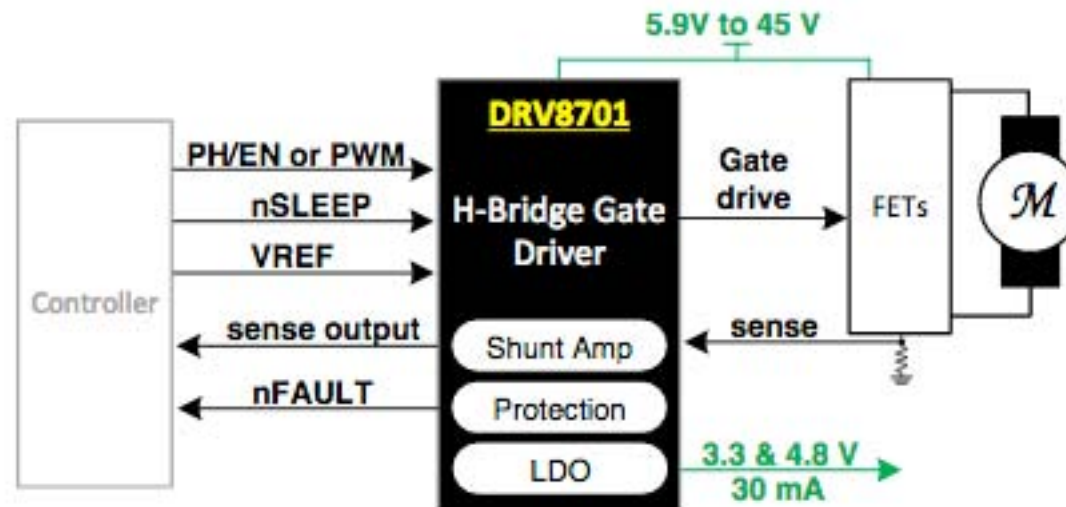


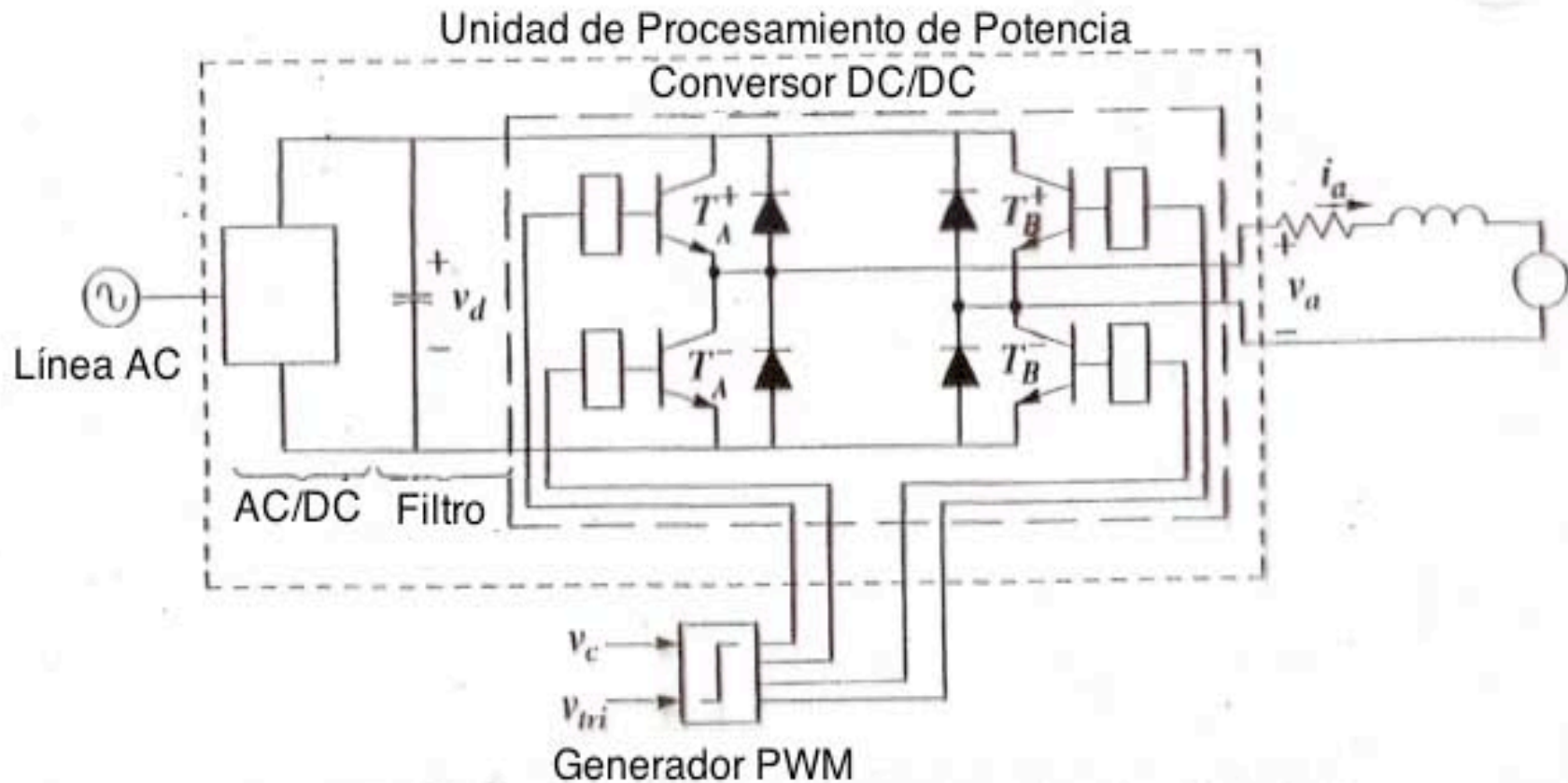
Diagrama de bloques simplificado de un control de motor DC usando el DRV8701 para implementar las funciones de controlador de los conmutadores del puente H y de limitador de corriente (cortesía Texas Instruments).

Comparación del puente H como actuador para máquinas DC con los conversores AC-DC con tiristores.

- 1.- Opera en los cuatro cuadrantes en forma automática.
- 2.- Ofrece la mayor velocidad de respuesta posible, limitada solamente por la frecuencia de conmutación deseada; la velocidad de respuesta del conversor AC-DC a tiristores es del orden de la frecuencia de línea.
- 3.- Es capaz de operar directamente desde una línea DC o desde una batería.

Desventajas:

- 1.- No es capaz de operar directamente desde una alimentación AC, requiere una etapa previa tipo conversor AC-DC y un filtro DC, en una configuración convertora AC-DC-DC.
- 2.- En esta configuración, si el conversor AC-DC de entrada es no controlado, se pierde la posibilidad de recuperar energía a la línea durante el frenado regenerativo, y se debe incluir una etapa adicional para disipar le energía recuperada.



Configuración convertora AC-DC-DC tipo puente H
 (“driver de motores” comercial)

Consideraciones de flujo de energía en la configuración convertora AC-DC-DC con puente H

- 1.- El convertor DC-DC con puente H opera en los cuatro cuadrantes y es por lo tanto completamente bidireccional en el flujo de energía.
- 2.- Durante la etapa de frenado regenerativo de la máquina DC la energía recuperada es transferida por el puente H al bus DC, donde se acumula en el condensador del filtro.

3.- Si el conversor AC-DC es bidireccional, esto es, capaz de entrar en inversión (los conversores AC-DC completamente controlados son bidireccionales) la energía recuperada en el condensador del filtro puede ser devuelta a la red de alimentación y el proceso de frenado, a nivel del sistema completo es regenerativo.

4.- Si el conversor AC-DC es unidireccional, esto es, incapaz de entrar en inversión (los conversores AC-DC no controlados y semi-controlados son unidireccionales) la energía recuperada en el condensador del filtro no puede ser devuelta a la red de alimentación y el proceso de frenado, a nivel del sistema completo no es regenerativo.

5.- Si el conversor AC-DC es unidireccional (por ejemplo un rectificador no controlado con diodos) la energía recuperada durante el frenado se acumula en el condensador del filtro DC y eleva la tensión DC en los terminales del mismo. Dado que no es aceptable que dicha tensión supere un determinado valor, será preciso incluir en el sistema actuador una etapa de descarga resistiva para disipar la energía acumulada durante el frenado. En este caso el frenado, a nivel del sistema actuador completo es disipativo, aunque a nivel de la combinación máquina DC-puente H el frenado sea regenerativo.

6.- Los conversores AC-DC no controlados son más simples y baratos que los completamente controlados, por lo que son los más usados actualmente, de forma que la mayoría de los actuadores (drivers) para motores DC son no regenerativos a nivel del sistema completo.

7.- La presión para aumentar la eficiencia energética de los equipos esta llevando a que los actuadores (drivers) de máquinas eléctricas de nueva generación tengan un rectificador completamente controlado, usualmente del tipo vectorial, para lograr además reducir la contaminación armónica inyectada a la línea y controlar el factor de potencia del sistema.