

¿POR QUE FALLAN LOS TRANSISTORES DE POTENCIA?

Los transistores de potencia son frágiles si los comparamos con sus antepasados las válvulas termoiónicas, o con otros semiconductores de potencia como los diodos tiristores y triacs.

Da igual que sean bipolares, MOSFETs o IGBTs. Todos ellos tienen una capacidad de sobrecarga muy limitada, que lo hace especialmente sensibles a un gran número de condiciones adversas que pueden darse en los circuitos electrónicos de conversión de energía. Esto obliga a los ingenieros a ser muy cuidadosos durante su elección y durante el diseño e implementación de las diversas protecciones, para garantizar la fiabilidad de todo el sistema. Lo peor de todo es que aun cuando se cree que todo está bajo control, ocurren fallos ocasionales de difícil explicación. Y es que existe una gran cantidad de causas que pueden provocar el fallecimiento de los transistores. En este artículo abordaremos la mayoría de ellas, así como los métodos a seguir para minimizarlas.

Fallo por exceso de corriente

La corriente produce calor al circular a través del dispositivo. La pérdida de potencia que provoca este calentamiento puede expresarse como el producto de la caída de voltaje en el transistor (Voltios) por la corriente en amperios que circula a través de él.

$$P_T = V \cdot I$$

Conocida como pérdidas en conducción, es directamente proporcional al valor de la corriente. La caída de voltaje en los transistores de potencia cuando estos conducen, se conoce como caída de voltaje en saturación, este valor suele estar entre 0.5 y 6 voltios dependiendo del dispositivo en cuestión, y depende poco de la corriente que circula.

Cada dispositivo tiene definido al menos tres parámetros referentes a este fenómeno:

- La corriente media máxima permitida, en A
- La corriente máxima de pulso, A
- La potencia máxima que puede disipar

El valor que dan la mayoría de los fabricantes en la hoja de datos del parámetro "Corriente continua de Colector (Drenador)", no hay que tomárselo muy en serio. No suele ser verdad al menos para el 99 % de las aplicaciones reales. Se refieren a la corriente que se puede hacer circular de modo continuo y prolongado en el tiempo a través del transistor, siempre que este se encuentre a 25 °C. Algo así solo se podría conseguir con una temperatura ambiente muy por debajo de cero grados, o con un

sistema de refrigeración tan sofisticado o voluminoso, que no valdría la pena implementar.

Es mucho más apropiado hacer uso del parámetro referente a la corriente continua a 100 °C. Se puede encontrar en casi todos los Datasheets, y es un 40 % menor que la corriente media a 25 °C.

Los fabricantes también suministran el gráfico de zona segura de trabajo del transistor SOA, pero el mismo también se refiere a su operación a 25 °C.

Además, hay que tener en cuenta, que estos parámetros no tienen en cuenta las pérdidas en conmutación. En la inmensa mayoría de las aplicaciones, los transistores de potencia no son objetos estáticos que permanecen por tiempo indefinido en estado de conducción o bloqueo, lo normal es que pasen de un estado a otro con una frecuencia de varios kHz. Cada encendido y apagado va acompañado de grandes pérdidas, que también contribuyen al calentamiento del transistor.

Resumiendo, podemos decir que la mayoría de las veces debemos elegir un transistor cuya corriente media máxima permitida (según hoja de datos) sea por lo menos el doble que la requerida por la aplicación

Además de la corriente media, también hay que tener en cuenta los valores de pico de la corriente. La hoja de datos lo recoge como corriente máxima de pulso (también a 25°C). Estos grandes picos de corriente suelen surgir durante la conmutación, provocados por factores como: capacitancia parásita de los transistores, inercia de los diodos anti paralelos, ausencia de tiempos muertos (shoot-through current), etc. A pesar de su corta duración, su gran potencia puede destruir los dispositivos sin que el calor llegue al cuerpo exterior (proceso adiabático).

Fallo por exceso de potencia

Este fenómeno va siempre acompañado de un sobrecalentamiento excesivo del cuerpo del transistor, que puede ocurrir por alguna de las siguientes causas:

- La potencia disipada en el transistor supera el valor máximo permitido en su hoja de datos
- Sistema de refrigeración deficiente, que no consigue extraer el calor generado
- Falta de potencia de la señal de control. El transistor no alcanza el estado de saturación para una corriente dada
- Frecuencia de conmutación demasiado elevada

Fallo por exceso de voltaje

Los transistores son extremadamente sensibles a los picos de voltajes entre sus electrodos, tanto estáticos como dinámicos. Un aumento del voltaje aplicado por encima de los valores máximos permitidos, casi siempre culmina con la destrucción del dispositivo, aunque la duración del pulso sea de unos pocos nanosegundos.

Los picos de sobre voltaje en el circuito de salida de los transistores aparecen durante el proceso de apagado, motivados por la energía acumulada en los elementos inductivos presentes en el convertidor.

En tiempo de diseño, el ingeniero debe tomar las medidas necesarias para asegurar que los picos de voltaje no superen el máximo permitido:

- Crear vías de escape para la energía almacenada en las cargas inductivas como motores y bobinas
- Disminuir al máximo las inductancias parásitas de las conexiones
- Implementar redes Snubbers para amortiguar las conmutaciones, usando resistores y capacitores de alta calidad, y colocándolas lo más cerca posible al transistor que se necesita proteger
- Limitar el d_i/d_t durante el apagado del transistor. El pico de voltaje es proporcional a la velocidad de caída de la corriente, esto es importante sobre todo en condiciones de sobrecarga y cortocircuito. El circuito de control y protección debe ser capaz de garantizar un apagado lento del transistor bajo estas condiciones anómalas, bajo las cuales la red Snubber pierde su efectividad. Esto requiere de la presencia de un Driver de compuerta con tres estados como el mostrado en fig1.

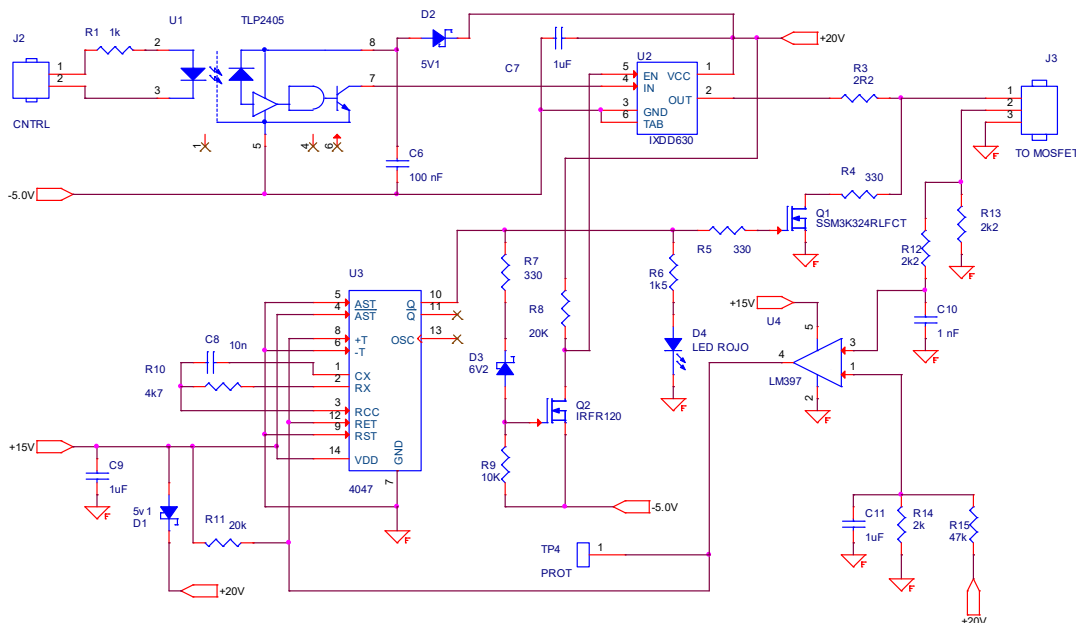


Fig.1 Circuito de control con protección de corriente.

En caso de sobrecarga o cortocircuito, se dispara el comparador U4, que pone el driver U2 en estado de alta impedancia, y activa el transistor Q1, para que el transistor de potencia se apague lentamente a través del resistor R4.

- Proteger la compuerta de los MOSFETs e IGBTs. Colocar una resistencia de varios kOhm entre compuerta y surtidor para eliminar el potencial estático, así como Zeners o diodos TVS que impidan excesos de voltajes en el circuito de entrada (ambas polaridades).
- Disminuir las oscilaciones (Ringing) de la señal de control colocando inductores y resistores en serie.

No se recomienda usar Varistores (MOVs) para proteger los semiconductores contra sobretensiones. Estos dispositivos tienen un periodo de vida muy limitado, y no son lo suficientemente rápidos. Es mucho más eficiente el uso de diodos TVS y redes Snubbers C, RC, RCD, etc.

Fallo por du/dt excesivo

Este fenómeno está asociado al efecto Miller y constituye un problema frecuente para los transistores que trabajan a alto voltaje, sobre todo aquellos que no están solos y forman parte de un semipunto o puente H, donde las rápidas entradas en conducción de unos influyen sobre el estado de los otros.

Cuando el voltaje del drenador o colector de un transistor varía rápidamente, parte del voltaje llega a la compuerta a través de la capacitancia parásita C_{DG} , que suele ser solo unas seis veces menor que la capacitancia de entrada C_{GS} . Este voltaje inducido puede ocasionar falsas entradas en conducción del transistor fuera de secuencia, cuando la polaridad es positiva o la destrucción de la unión GS si la polaridad es invertida y la amplitud supera el voltaje máximo permitido.

Para evitar problemas hay que limitar el du/dt por debajo del valor máximo permitido para el transistor dado según su hoja de datos. Esto se consigue mediante el uso de redes Snubbers, o aumentando el valor de la resistencia R_G a la salida del driver de compuerta, para aumentar el tiempo de encendido y apagado del transistor (dentro de lo razonable). El aumento de la resistencia R_G del circuito de compuerta aumenta las pérdidas en conmutación y acentúa el efecto Miller. Existen circuitos integrados de control de compuerta que luchan contra el efecto Miller, cortocircuitando la entrada del transistor cuando este se encuentra en estado de bloqueo (Active Miller Clamp).

Fallos por interferencias y ruidos

El convertidor puede verse afectado por ruidos externos o internos, que afecten el correcto funcionamiento del sistema de control alterando la secuencia de funcionamiento o la calidad de los pulsos de control, lo que podría provocar el fallo de alguno o varios transistores.

Otros fallos

Como es obvio, el funcionamiento de los transistores de potencia, depende del resto de componentes que forman parte del circuito, cada uno de los cuales cumple una tarea asignada. El mal funcionamiento de cualquiera de ellos puede motivar la muerte de un transistor, por este motivo los mismos deben ser seleccionados de forma cuidadosa para reducir al mínimo el número de averías.

Hay componentes que se sabe de antemano que tarde o temprano terminan averiándose, debido a las altas cargas de potencia que soportan. Un ejemplo de ellos son los capacitores de inducción en los inversores resonantes de alta frecuencia. A su vez, ellos provocan que desaparezcan las condiciones de apagado de los transistores en paso por cero de corriente y voltaje. Esta situación debe ser detectada por el circuito de protección, para evitar una muerte segura de todos los transistores.

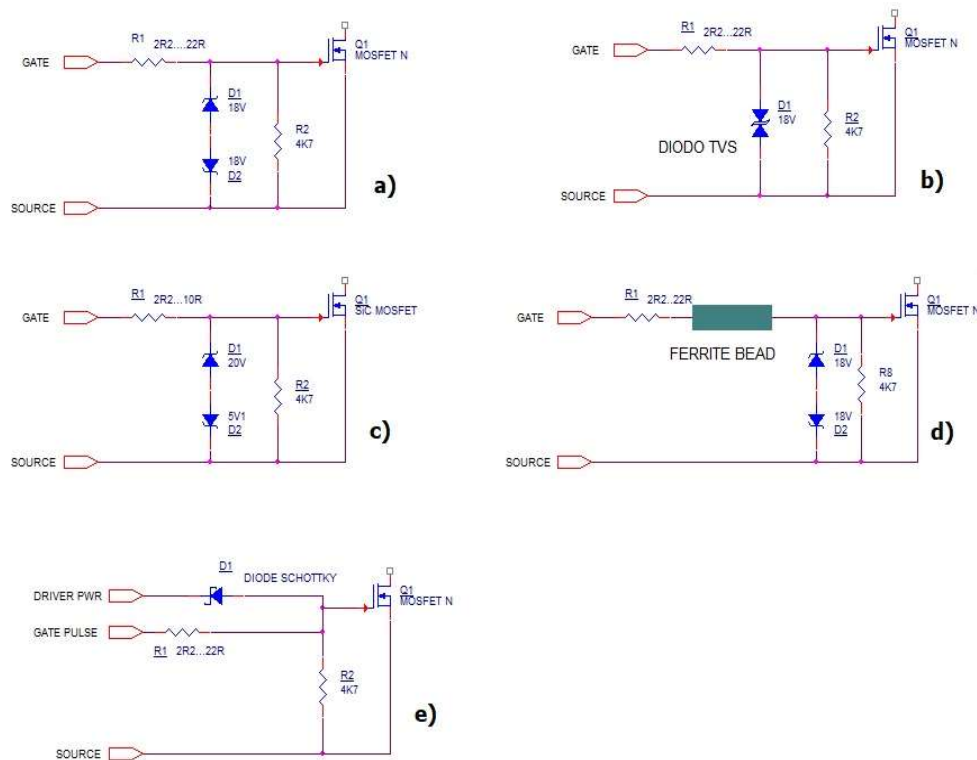


Fig.2. Protección de la entrada del transistor contra sobre voltaje.

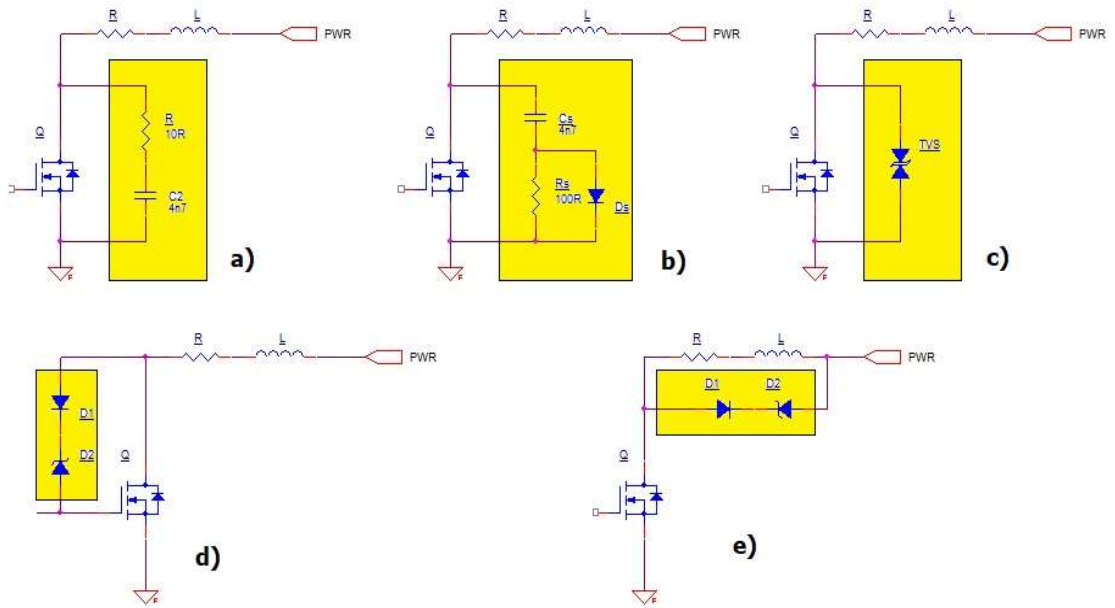


Fig.3. Redes de protección contra picos de voltajes.

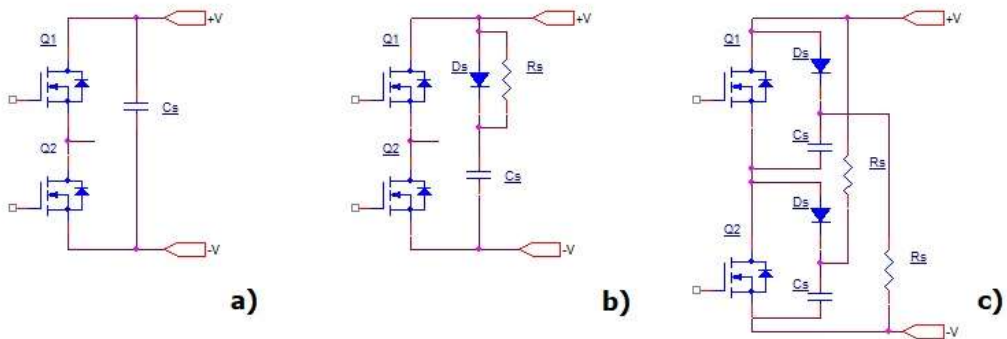


Fig.4. Redes Snubbers sobre el bus de alimentación.