

DISPOSITIVOS EMERGENTES I.

El desarrollo de un amplio mercado para aplicaciones con muy altos niveles de potencia (HVDC, FACTS, control de motores de muy alta potencia, generación de electricidad a partir de energías alternativas, etc.) y el éxito logrado con el desarrollo de los IGBTs, dispositivos que incorporan en su estructura elementos funcionales tanto de tipo bipolar como de compuerta aislada ha llevado a que se propongan varios tipos nuevos de conmutadores completamente controlados que combinan el mecanismo de conducción de la corriente principal de los SCR que, en la tecnología de Si es el que permite la mayor densidad de corriente y muy altos voltajes de bloqueo, con esquemas de control de corriente del tipo compuerta aislada, que es el que permite lograr la conmutación con la menor energía de control.

Entre estos nuevos dispositivos, muchos de los cuales no han pasado de ser básicamente experimentales, se pueden agrupar en dos líneas de desarrollo: integrar todas las funciones en un solo dispositivo monolítico o buscar una implementación híbrida, en la que el conmutador controlado está formado por la combinación de dispositivos individuales que implementan funciones específicas, agrupados en un encapsulado común.

I.- DISPOSITIVOS MONOLÍTICOS: TIRISTORES CONTROLADOS POR COMPUERTA AISLADA, MCT (MOS-Controlled Thyristor)

Los Tiristores Controlados por compuertas aisladas (Mos-Controlled Thyristors, MTC) son un dispositivos monolíticos, en cuya estructura se define una configuración básica tipo PNP, encargada de las funciones de bloqueo y conducción de la corriente de trabajo, y sendas estructuras tipo MOSFET canal N y MOSFET canal P, encargadas de las funciones de encendido y apagado por compuerta.

A su vez se han propuesto dos configuraciones básicas, las del P-MCT y el N-MCT.

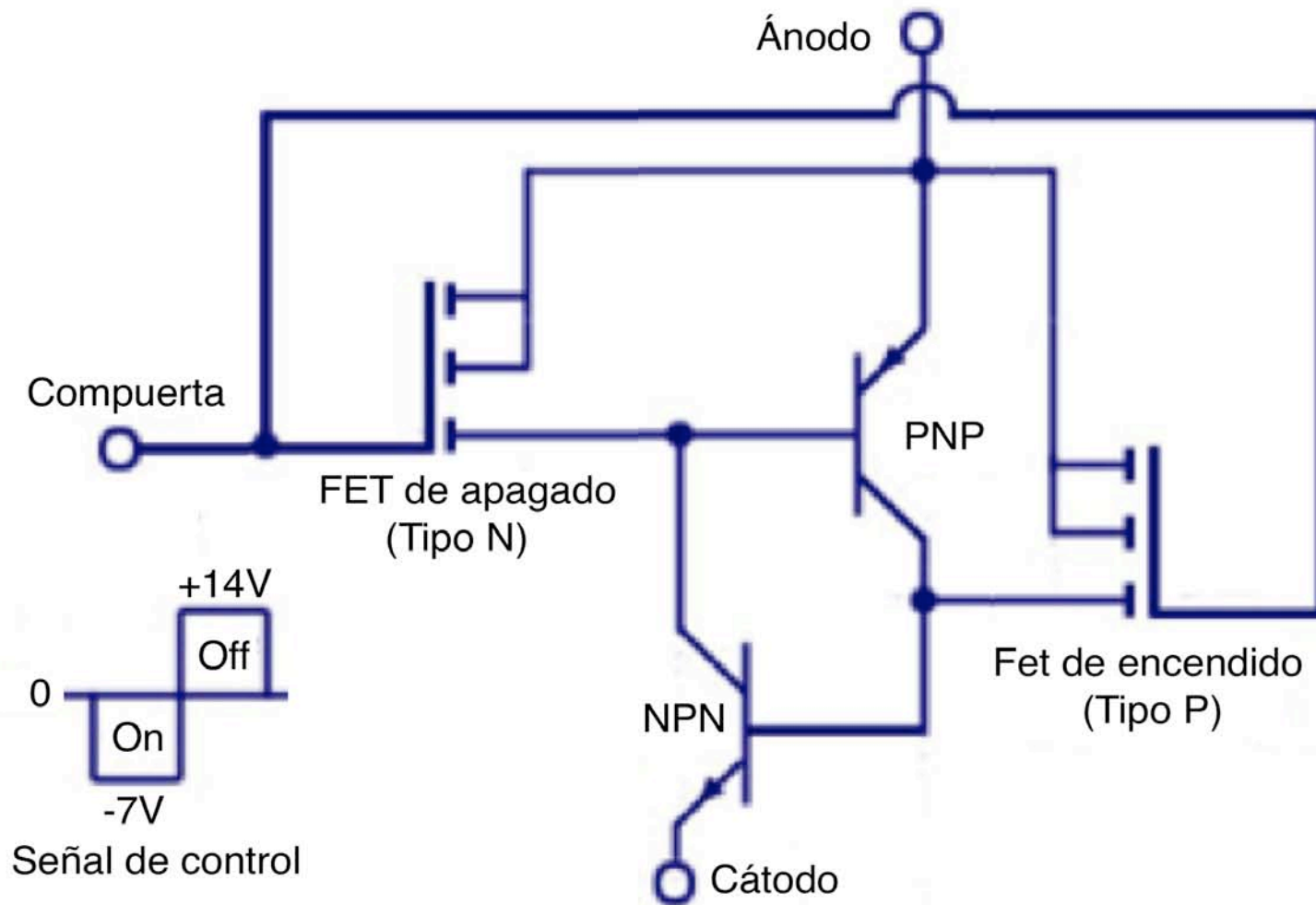
En la configuración P-MCT las estructuras tipo MOSFET encargadas del encendido y el apagado del SCR están asociadas con el ánodo del SCR principal, mientras que en los N-MCT las estructuras tipo MOSFET encargadas del encendido y el apagado del SCR están asociadas con el cátodo del SCR principal.

En términos del modelo de los dos transistores del SCR, la configuración P-MCT enciende o apaga al SCR principal inyectando o extrayendo corriente de base a nivel del transistor equivalente NPN, mientras que la configuración N-MCT enciende o apaga al SCR principal extrayendo o inyectando corriente de base a nivel del transistor equivalente PNP.

En ambos casos el dispositivo se construye en base a un arreglo de celdas individuales, diseñado y construido en base a las configuraciones y estructuras semiconductoras probadas en el desarrollo de los PowerMOSFETs y los IGBTs, pero con un nivel de complejidad significativamente mayor.

La estructura de los dos tipos de MCT es básicamente la misma, intercambiando las funciones de los terminales de ánodo y cátodo y reemplazando todas las regiones de dopado P por dopado N y todas las de dopado N por dopado P.

Dada la diferencia muy significativa que existe entre las ganancias de corriente de encendido y de apagado en una estructura tipo SCR, cada una de las celdas individuales en un MCT tiene asociado un OFF-FET, mientras que solamente entre un 5 a un 10% de las celdas individuales en un MCT tienen asociado un ON-FET; las demás celdas se encienden por difusión de portadores desde las celdas donde se aplican los pulsos de encendido.



P-MCT: circuito equivalente y estructura de la señal de control de encendido/apagado.

En esta configuración, para encender al SCR principal, se debe activar el "ON-FET" (FET tipo P), lo que se produce al aplicar una tensión negativa del valor adecuado (-7V en el ejemplo) entre el terminal de Compuerta y el de Cátodo; esto abre un camino de conducción entre el terminal de Ánodo y la base del transistor NPN, inyectando corriente de base en dicho transistor, lo que abre el camino para que circule corriente de base en el transistor PNP y se inicie el lazo de realimentación positiva que lleva a la saturación de ambos transistores y al enganche en conducción del SCR principal.

Una vez iniciado el proceso de realimentación positiva, cuando la corriente I_{AK} haya alcanzado el nivel de enganche, I_L , la señal de disparo puede ser suprimida, regresando la tensión de compuerta a su nivel de reposo de 0 voltios.

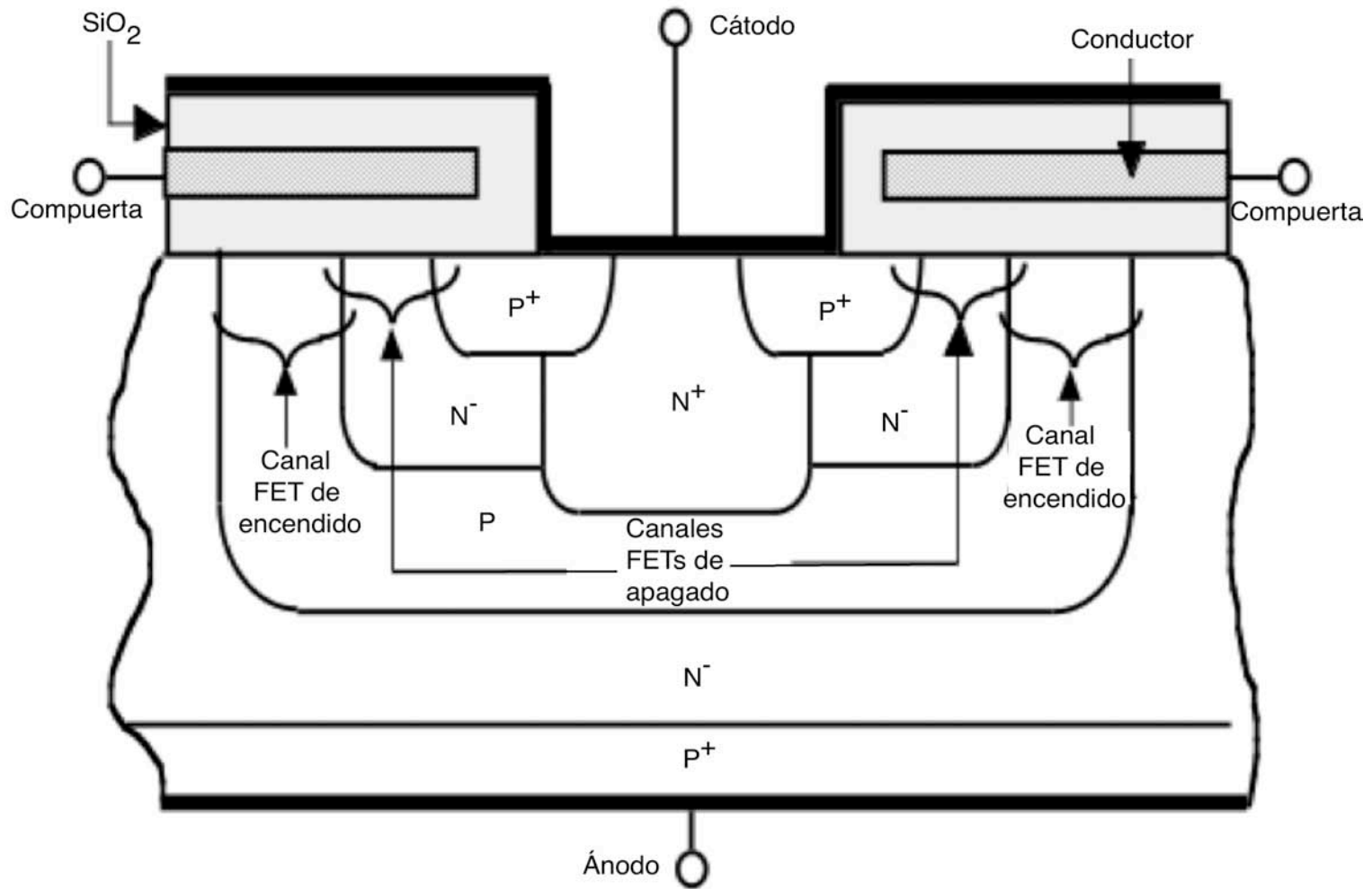
Sin embargo, como medida de seguridad para evitar el apagado accidental del MTC, es conveniente mantener el pulso de encendido aplicado durante todo el intervalo de conducción del MTC.

Cuando se desea apagar el SCR principal, se debe activar el "OFF-FET" (FET tipo N), lo que se produce al aplicar una tensión positiva del valor adecuado entre el terminal de Compuerta y el Cátodo; esto cortocircuita la unión base-emisor del transistor PNP, haciendo que la corriente de colector del PNP se reduzca, reduciendo la corriente de base del transistor NPN e iniciando el ciclo de apagado; el pulso de apagado debe permanecer aplicado hasta que la corriente I_{AK} en el SCR se reduzca por debajo del correspondiente valor de la corriente de sostenimiento, I_H , del SCR, de lo contrario el proceso de apagado abortará y el SCR permanecerá en conducción.

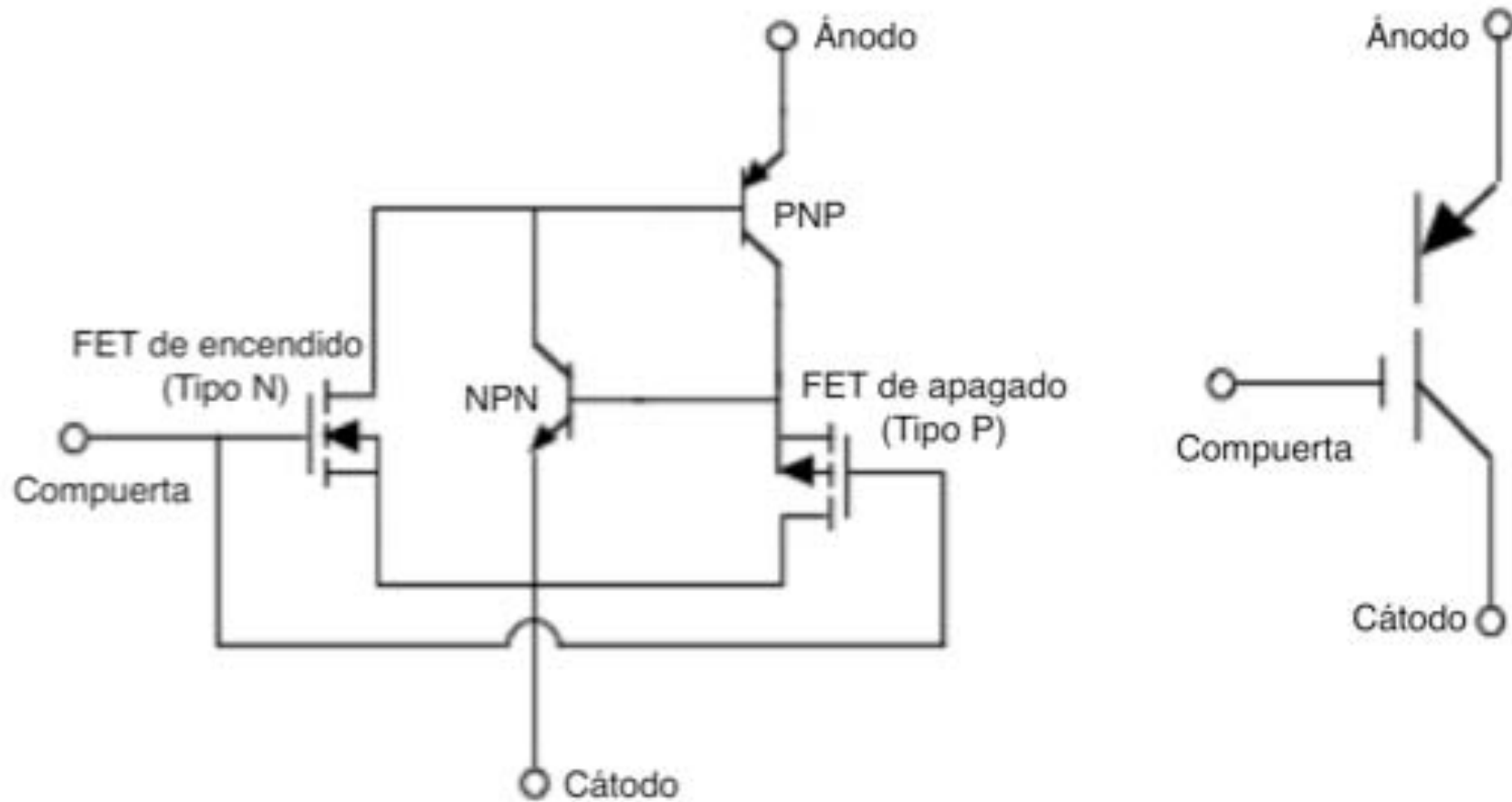
Dada la incertidumbre sobre el valor exacto de la corriente de sostenimiento, en la práctica el pulso de apagado se debe mantener por lo menos hasta que se detecte que se ha anulado totalmente la corriente AK del MTC, incluyendo el pulso de corriente inversa de recuperación.

Como medida de seguridad adicional, es conveniente mantener el pulso de apagado aplicado durante todo el tiempo de apagado del MTC, para evitar encendidos accidentales.

2.- Estructura N-MCT



Estructura del Tiristor controlado por MOS tipo N (N-MCT)



N-MCT: circuito equivalente (izquierda) y símbolo circuital propuesto (no estandarizado) (derecha)

En esta configuración, para encender al SCR principal, se debe activar el "ON-FET" (tipo N), lo que se produce al aplicar una tensión positiva del valor adecuado entre el terminal de Compuerta y el de Cátodo; esto abre un camino de conducción entre la base del transistor PNP y el terminal de Cátodo, inyectando corriente de base en dicho transistor, lo que abre el camino para que circule corriente de base en el transistor NPN y se inicie el lazo de realimentación positiva que lleva a la saturación de ambos transistores y al enganche en conducción del SCR principal.

Una vez iniciado el proceso de realimentación positiva, cuando la corriente I_{AK} haya alcanzado el nivel de enganche, I_L , la señal de disparo puede ser suprimida, regresando la tensión de compuerta a su nivel de reposo de 0 voltios.

Sin embargo, como medida de seguridad para evitar el apagado accidental del MTC, es conveniente mantener el pulso de encendido aplicado durante todo el intervalo de conducción del MTC.

Cuando se desea apagar el SCR principal, se debe activar el "OFF-FET" (tipo P), lo que se produce al aplicar una tensión negativa del valor adecuado entre el terminal de Compuerta y el Cátodo; esto cortocircuita la unión base-emisor del transistor NPN, lo que hace que la corriente de colector del NPN se reduzca, reduciendo la corriente de base del transistor PNP e iniciando el ciclo de apagado; el pulso de apagado debe permanecer aplicado hasta que la corriente I_{AK} en el SCR se reduzca por debajo del correspondiente valor de la corriente de sostenimiento, I_H , del SCR, de lo contrario el proceso de apagado abortará y el SCR permanecerá en conducción.

Dada la incertidumbre sobre el valor exacto de la corriente de sostenimiento, en la práctica el pulso de apagado se debe mantener por lo menos hasta que se detecte que se ha anulado la corriente AK del MTC, incluyendo el pulso de corriente inversa de recuperación.

Como medida de seguridad adicional, es conveniente mantener el pulso de apagado aplicado durante todo el tiempo de apagado del MTC, para evitar encendidos accidentales.

Características de los MCT.

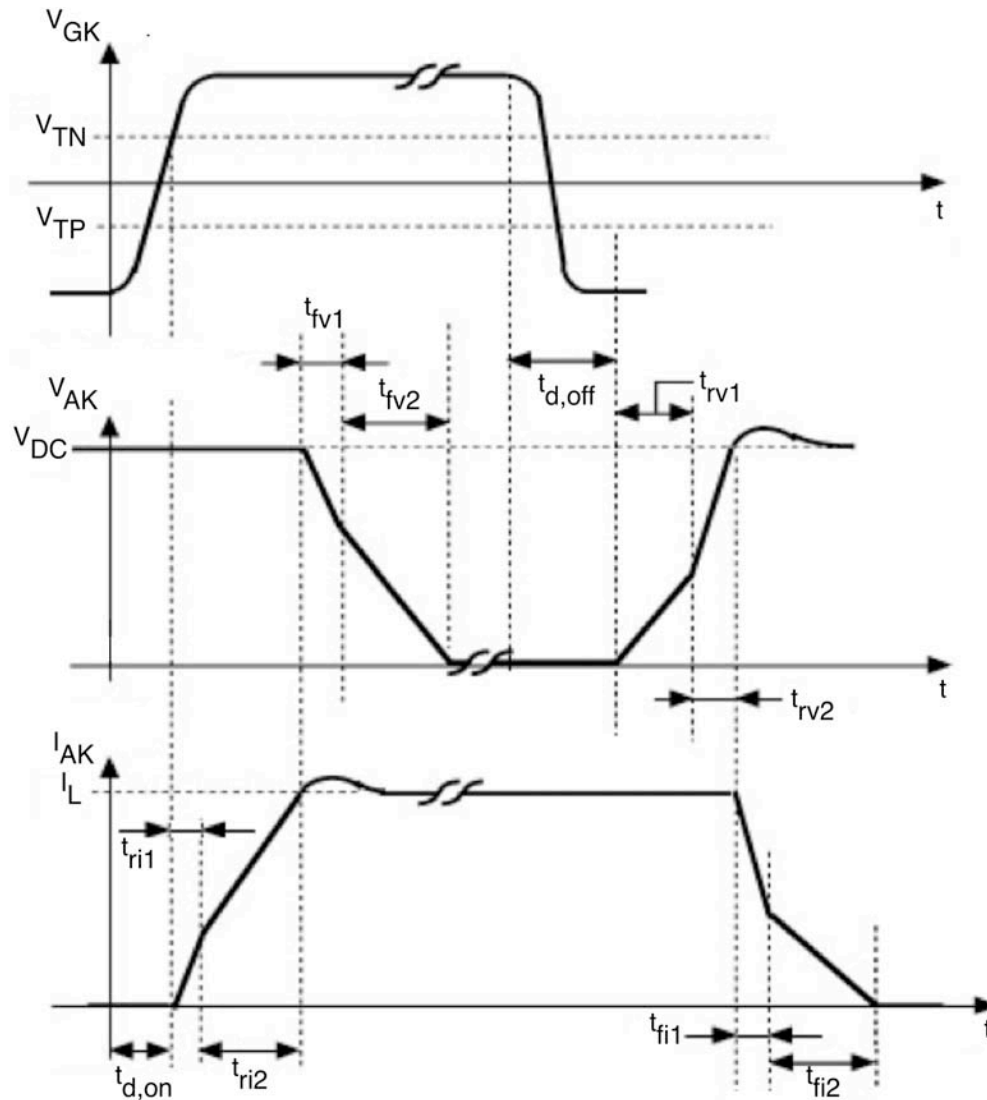
Salvo las características de compuerta, que en los MTCs carecen de sentido, y son reemplazadas por las de los FETs de encendido/apagado, todas las demás características de los SCRs rápidos se aplican a ambos tipos de MTCs.

Procesos de conmutación del MCT.

Las conmutaciones del MCT están caracterizadas por el fabricante con un diagrama de tiempos de conmutación de encendido y apagado, definidos para una señal de control aplicada entre los terminales de control de muy alta velocidad de subida y bajada (usualmente 200ns o menos), cuando el MCT está conectado en un circuito con una tensión de alimentación constante V_{DC} , controlando una carga inductiva de corriente I_L , en una

configuración con diodo de libre conducción de alta velocidad de conmutación (idealmente un diodo Schottky).

El diagrama que se presenta corresponde a un N-MCT, el de un P-MCT es equivalente, cambiando en la referencia de la señal de control el terminal de cátodo por el de ánodo e invirtiendo la polaridad de los niveles de encendido y apagado del MCT.



Formas de onda características de la conmutación de un N-MCT .

Proceso de encendido.

Como condición inicial se asume que existe la corriente de carga en su valor nominal, I_L , que está circulando en el lazo cerrado carga-diodo de libre conducción en el momento en el cual se aplica la señal de encendido en la compuerta del MCT.

El proceso de encendido comprende los siguientes intervalos:

- 1.- Tiempo de retardo de encendido, $t_{d(on)}$. Concluida la subida del pulso de control desde el valor de apagado hasta el de encendido, que debe ocurrir en un tiempo no mayor a los 200ns, se inicia el proceso de entrada en conducción del ON-FET. En este intervalo no hay cambios observables en la corriente o la tensión A-K.

2.- Tiempo de alza de la corriente, t_{ri} . Es el tiempo que transcurre desde que se inicia la circulación de corriente AK hasta que dicha corriente alcanza su valor final. Durante este intervalo la tensión AK permanece constante porque el diodo de libre conducción está encendido, manteniendo el terminal de Ánodo a la tensión de la fuente. El tiempo de alza de la corriente se divide en dos sub-intervalos:

a.- t_{ri1} : Primer tiempo de subida de la corriente: La corriente inicial circula por el ON-FET y el correspondiente transistor BJT a medida que este se enciende.

b.- t_{ri2} : Segundo tiempo de subida de la corriente: Se encienden los dos transistores bipolares, derivando la corriente del ON-FET e iniciando el proceso de avalancha de encendido; la corriente sube mas lentamente hasta su valor final.

3.-Tiempo de bajada del voltaje, t_{fv} . Una vez que la corriente AK alcanza el valor de la corriente de carga el diodo de libre conducción se apaga y la tensión AK empieza a descender. Este tiempo se subdivide en dos intervalos:

a.- t_{fv1} : Los BJTs están en la zona activa, y la tensión AK cae rápidamente.

b.- t_{fv2} : Los BJTs entran en la zona de cuasi-saturación y la pendiente de caída del voltaje se reduce; el sub-intervalo y el proceso de encendido termina cuando la tensión AK se estabiliza en su valor nominal de caída en conducción directa.

Proceso de apagado.

Como condición inicial se asume que la corriente AK es igual a la corriente de carga, I_L , y que la tensión AK esta en el valor de caída de tensión nominal en conducción, que la tensión de alimentación V_{DC} está aplicada a la carga y que el diodo de libre conducción está polarizado en inverso y no conduce corriente en el momento en el cual se aplica la señal de apagado en la compuerta del MCT.

El proceso de apagado comprende los siguientes intervalos:

- 1.- Tiempo de retardo de apagado, t_{doff} . Concluida la bajada del pulso de control de control desde el valor de encendido hasta el de apagado, que debe ocurrir en un tiempo no mayor a los 200ns, el tiempo de retardo de apagado es el tiempo requerido para que

la tensión compuerta-cátodo alcance el valor de apagado y se remueva una parte sustancial de la carga almacenada en la base de los transistores para que estos salgan del estado de saturación profunda. Durante este intervalo no hay cambios significativos ni en la tensión ni en la corriente AK.

2.-Tiempo de subida del voltaje, t_{rv} : Iniciado el proceso de realimentación positiva de apagado la tensión AK empieza a subir hacia el valor de la tensión de alimentación, V_{DC} . Este proceso ocurre a corriente AK constante igual a I_L , porque el diodo de libre conducción sigue polarizado en inverso. El intervalo se divide en dos sub-intervalos:

a.- t_{rv1} : Primer tiempo de subida del voltaje: Los BJTs están todavía en cuasi-saturación y la pendiente de subida del voltaje es baja.

- b.- t_{rv2} : Segundo tiempo de subida del voltaje: Los BJTs entran en la zona activa y la pendiente de subida del voltaje es alta.
- 3.- Tiempo de caída de la corriente, t_{fi} . Una vez que la tensión AK alcanza el valor final, V_{DC} , el diodo de libre conducción queda polarizado en directo y la corriente AK del MTC puede empezar a reducirse, transfiriendo la corriente de la carga al diodo. El intervalo se divide en dos sub-intervalos:
- a.- t_{fi1} : Primer sub-intervalo de caída de la corriente, durante el cual la corriente cae rápidamente mientras el transistor de alta ganancia esta en proceso de apagado.
- b.- t_{fi2} : Segundo sub-intervalo de caída de la corriente la corriente cae lentamente, formando una “cola de corriente” mientras la carga atrapada en la base del transistor de baja ganancia se

recombina. Este sub-intervalo y el proceso de apagado termina cuando la corriente AK se estabiliza en el valor de la corriente de fuga en polarización directa del MTC, y toda la corriente de carga, I_L , circula por el diodo de libre conducción.

El análisis de los procesos de conmutación se realiza, como con todos los dispositivos de control de potencia, asumiendo que el diodo de libre conducción no introduce retardos adicionales.

Situación actual de los desarrollos.

Los datos que se siguen corresponden a dispositivos que se presentaron en el mercado, pero que posteriormente fueron declarados "obsoletos" por el fabricante que suspendió la oferta. No se tiene información de la causa de esta decisión, ni sobre la posibilidad de que los MCT regresen al mercado abierto.

I_{\max} definida por la máxima corriente controlable en apagado, de 50 a 100A

V_{\max} definida por en más bajo entre los valores de ruptura del tiristor y el OFF-FET. Actualmente 600V. Prototipos de 2000V.

dv/dt. Dispositivos con 500 a 1000 v/ μ s.

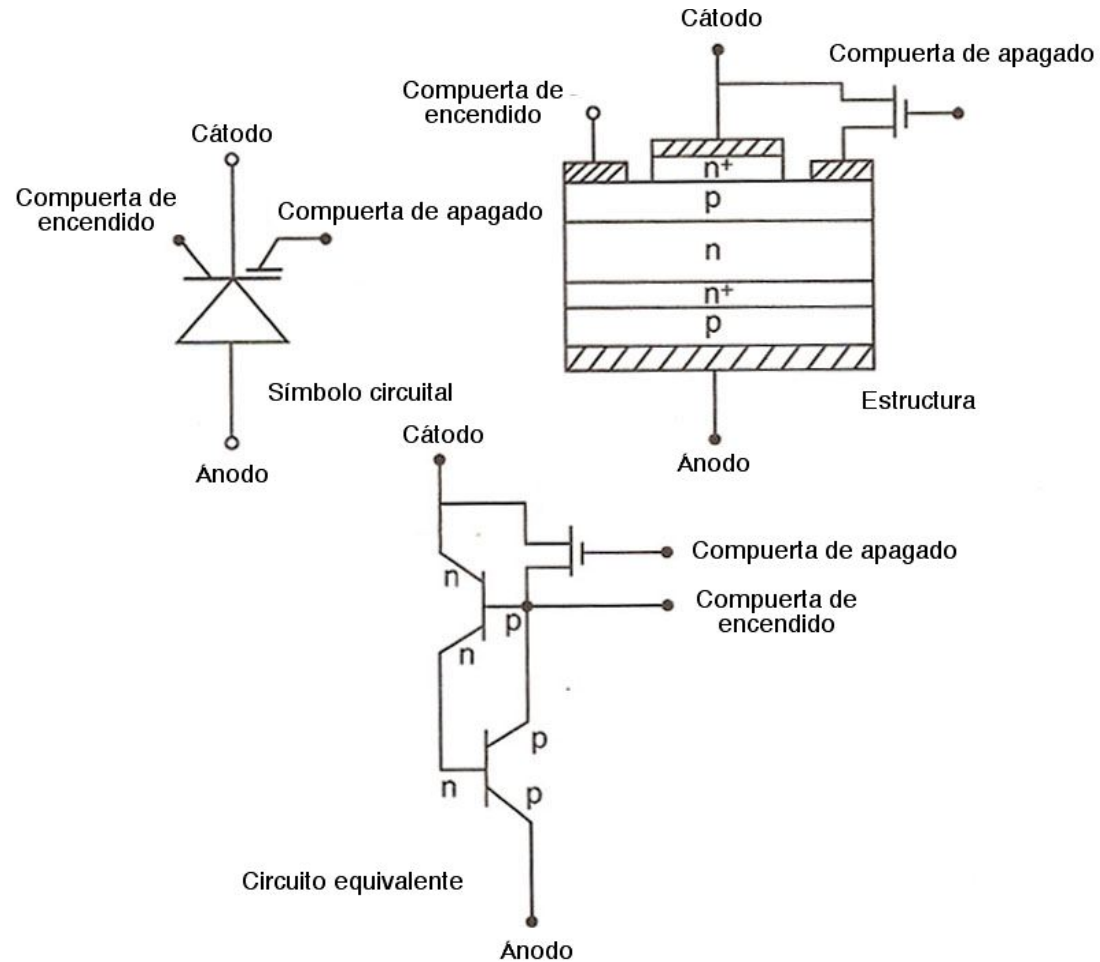
di/dt. Dispositivos con 500 A/ μ s.

II.- DISPOSITIVOS HÍBRIDOS.

A.-Tiristor apagado por MOSFET, MTO (Mos Turn-Off thyristor).

Es un dispositivo híbrido formado por un GTO convencional y un arreglo de MOSFETs individuales conectados en paralelo entre la compuerta y el cátodo del GTO.

El dispositivo híbrido resultante tiene dos compuertas, la del GTO que sirve como compuerta de encendido normal, y la del arreglo de MOSFETs conectados en paralelo que sirve de compuerta de apagado.



El MTO: Estructura circuital (arriba, derecha), símbolo propuesto (no estandarizado, arriba izquierda) y circuito equivalente (abajo)

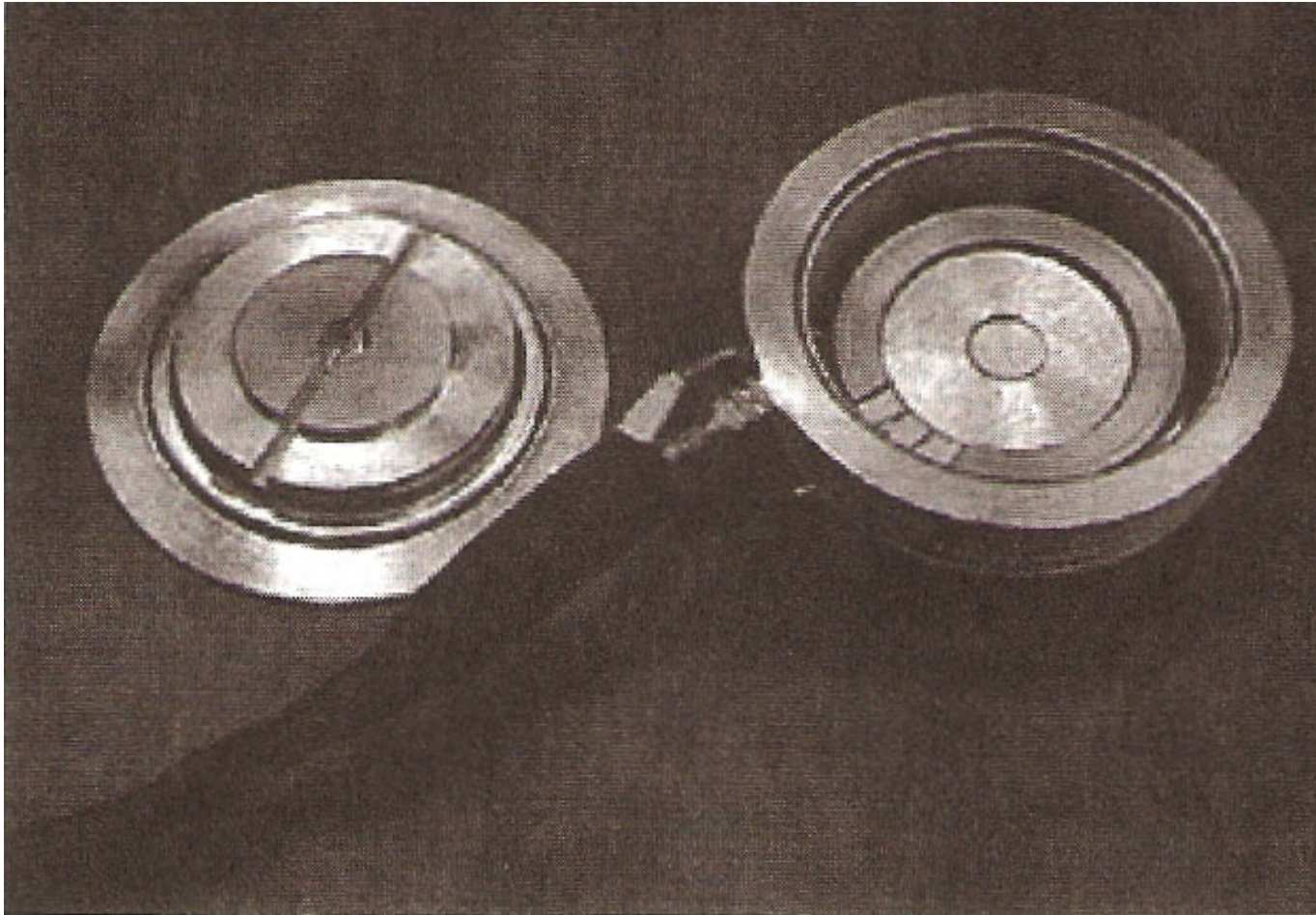


Foto de un MTO implementado en el Laboratorio de desarrollo, con el encapsulado abierto mostrando el GTO que maneja la corriente principal (izquierda) y el arreglo de MOSFETs de apagado dispuesto en anillo (derecha).

El proceso de encendido y de conducción del MTO es función del GTO y es completamente convencional.

Para apagar el MTO se enciende el arreglo de MOSFETs, lo que abre un camino de conducción a través del cual la corriente principal sale del GTO por el terminal de compuerta, cortando la corriente de base del transistor bipolar inferior (el NPN) del circuito equivalente del GTO, iniciando el proceso normal de apagado del GTO.

Los MOSFETs no soportan tensión de bloqueo, y pueden ser por lo tanto dispositivos de baja tensión, con la mínima resistencia en conducción posible. La capacidad de corriente del arreglo de MOSFETs debe ser por lo menos igual a la máxima corriente de apagado del GTO.

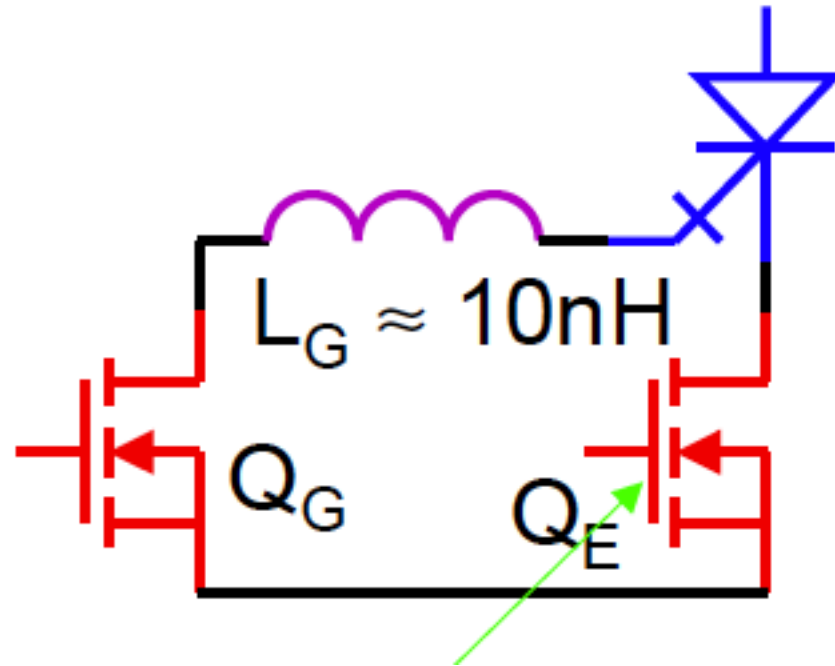
Los proponentes del MTO postulan que si se optimizan las características del GTO y de los MOSFETs auxiliares el resultado será un dispositivo híbrido casi tan simple de usar como un SCR convencional pero capaz de conmutar en apagado en forma controlada como un GTO, pero sin requerir un circuito de control del nivel de complejidad requerido por un GTO convencional.

Hasta la fecha no parece que existan dispositivos tipo MTO en el mercado abierto.

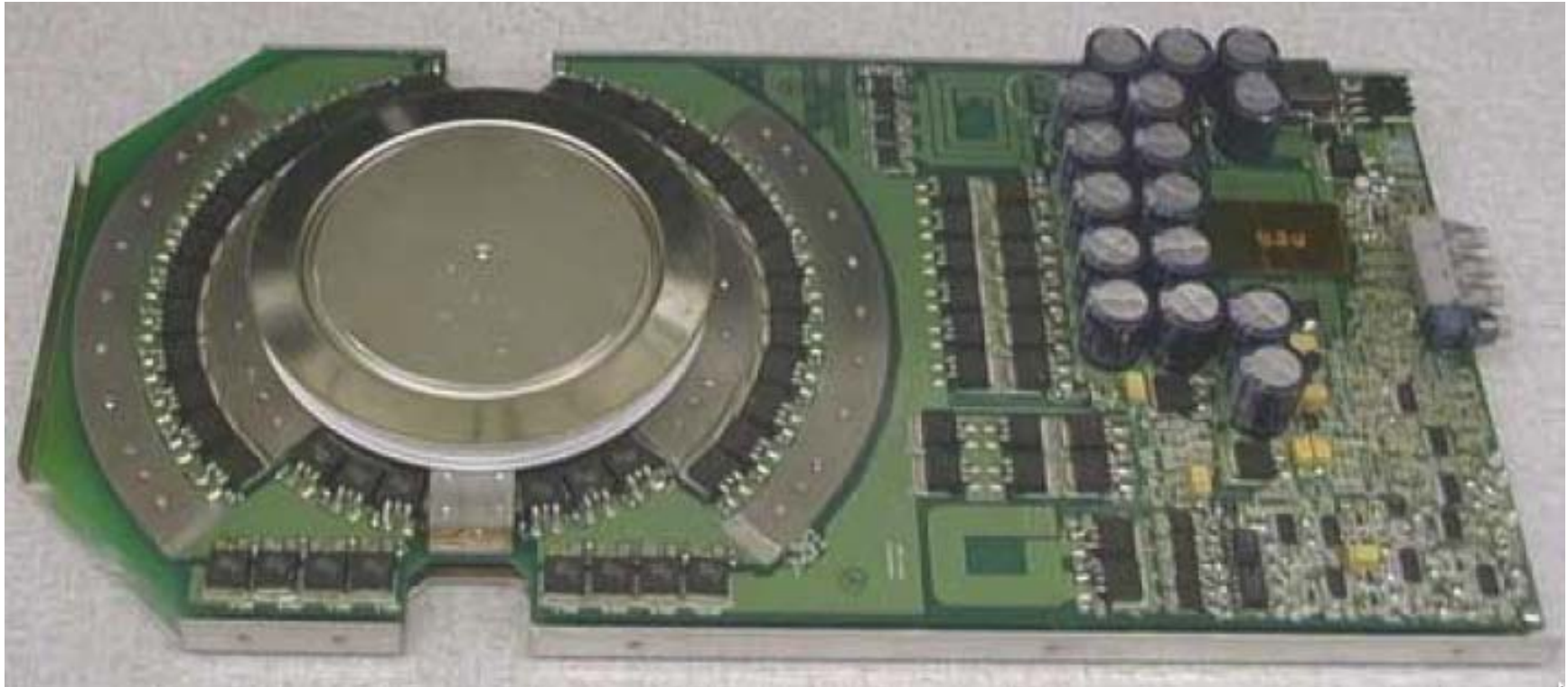
B.-Tiristor apagado por Emisor (ETO, Emitter Turn-Off Thyristor).

Es un dispositivo híbrido formado por un GTO y dos arreglos de MOSFETs individuales conectados en paralelo; uno de los dos arreglos se conecta en serie con el cátodo del GTO y el otro se conecta en entre la compuerta del GTO y la salida del primer arreglo .

El dispositivo híbrido resultante tiene tres compuertas, la del GTO que sirve como compuerta de encendido normal, y la de cada uno de los arreglos de MOSFETs conectados en paralelo que intervienen en el proceso de apagado.



Circuito equivalente del ETO (no se muestra la conexión entre la compuerta del GTO y su circuito de encendido).



Fotografía de un prototipo de desarrollo de ETO de tercera generación, mostrando el GTO, los arreglos de MOSFETs y el resto de los circuitos auxiliares de encendido y apagado.

Para encender el ETO se apaga el arreglo de MOSFETs Q_G , se enciende en arreglo de MOSFETs Q_E , y simultáneamente se aplica el pulso normal de encendido a la compuerta del GTO. La corriente de trabajo circula por el GTO y el arreglo Q_E , en serie con el GTO; el número de MOSFETs en paralelo en Q_E debe ser suficiente para minimizar la resistencia serie adicional y mantener las pérdidas en conducción en un valor razonable.

Para iniciar el proceso de apagado simultáneamente se enciende el arreglo Q_G y se apaga el arreglo Q_E . El encendido de Q_G abre un camino de baja impedancia entre la compuerta del GTO y la salida del ETO, y el apagado de Q_E eleva la tensión entre la salida del ETO y la compuerta del GTO.

La combinación de estos dos efectos simultáneos desvía la corriente principal del GTO del terminal de cátodo al de compuerta, y apaga al dispositivo.

Los MOSFETs del arreglo Q_E no soportan una tensión significativa, y solo es necesario que su tensión de bloqueo sea superior a la tensión de avalancha cátodo-compuerta del GTO.

Los proponentes de este híbrido postulan que, dada la velocidad de conmutación de los MOSFETs conectados en serie con el Cátodo de GTO, la velocidad de conmutación de apagado del arreglo ETO debe resultar muy superior a la de un GTO convencional, y que además no debe haber problemas con el valor del dV/dt re-aplicado, lo que permitiría que los ETOs fuesen usados en convertidores DC/DC o DC/AC a frecuencias muy superiores a las posibles con GTOs convencionales.

Hasta la fecha no parece que existan dispositivos tipo ETO en el mercado abierto.

Como comentario final hay que indicar que los MTOs y los ETOs son hasta la fecha propuestas puramente experimentales a nivel de laboratorio de desarrollo de dispositivos y no se tiene noticia de cuando puedan ofrecerse en el mercado, ni siquiera de si esto será posible algún día.