

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 968 856**

51 Int. Cl.:

H01T 13/50 (2006.01)

F02P 3/08 (2006.01)

F02P 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.04.2006** **E 14192645 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.10.2023** **EP 2908393**

54 Título: **Método y aparato para hacer funcionar un elemento de encendido de chispa móvil a alta presión**

30 Prioridad:

19.04.2005 US 672892 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

14.05.2024

73 Titular/es:

**KNITE, INC. (100.0%)
501 Forrestal Rd., Suite 119
Princeton, NJ 08540, US**

72 Inventor/es:

**SUCKEWER, ARTUR;
SUCKEWER, SZYMON y
SELMON, FREDERICK H.**

74 Agente/Representante:

BERTRÁN VALLS, Silvia

ES 2 968 856 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y aparato para hacer funcionar un elemento de encendido de chispa móvil a alta presión

5 **1. Campo de la invención**

Esta invención se refiere a los campos de generación de plasma, encendidos y los motores de combustión interna (IC). En particular, se refiere, pero sin limitarse a, métodos de encendido y aparatos de encendido para su uso en los mismos; y, específicamente, a métodos y aparatos de encendido para diversas aplicaciones incluyendo, pero sin limitarse a, motores de alta presión. Más particularmente, algunos aspectos se refieren al suministro de corriente de
10 descarga a elementos de encendido de chispa móvil con el fin de maximizar su rendimiento y longevidad, especialmente en motores de combustión interna que funcionan a altas presiones.

15 **2. Discusión de la técnica relacionada**

Por diversas razones, hoy en día existe interés en aumentar las presiones en los motores de combustión interna y entornos de combustión similares, con la necesidad concomitante de fuentes de encendido capaces de funcionar en estos entornos. Por ejemplo, a las empresas de automóviles y a los fabricantes de motores de combustión interna les gustaría poder proporcionar vehículos que tengan motores IC que funcionen a presiones mucho más altas que
20 los motores de combustión interna convencionales. Sin embargo, hasta la fecha no ha habido un sistema de encendido eficaz y práctico para tales motores. Entre otras preocupaciones están la longevidad de los elementos de encendido (bujías) y la fiabilidad del encendido del elemento de encendido.

El elemento de encendido de chispa móvil (TSI) es un dispositivo que se ha considerado como un prometedor reemplazo de bujías para motores de combustión interna, pero anteriormente no para motores de alta presión. Los TSI, por ejemplo, se han mostrado en varias patentes anteriores incluyendo, por ejemplo, las patentes estadounidenses n.ºs 6.321.733 y 6.474.321, ambos cedidos al mismo cesionario que esta invención.

Brevemente, un sistema de encendido basado en TSI proporciona un gran núcleo de plasma que se propaga a lo largo de los electrodos del elemento de encendido mediante la fuerza de Lorentz (junto con fuerzas térmicas, en menores grados) y se propulsa hacia una cámara de combustión. La fuerza de Lorentz que actúa sobre el núcleo de encendido (es decir, el plasma) se crea mediante la interacción de la corriente de descarga en el plasma con un campo magnético producido por esa misma corriente en los electrodos del elemento de encendido. La magnitud de la fuerza de Lorentz es proporcional al cuadrado de esa corriente. En motores que funcionan a presiones normales
35 (es decir, un máximo de aproximadamente 120 psi), los elementos de encendido de chispa móvil proporcionan ventajas significativas sobre las bujías convencionales debido al gran volumen de plasma que generan, normalmente entre 100-200 veces mayor que el de una bujía convencional para una energía de descarga comparable. Es posible lograr una eficiencia aumentada y emisiones reducidas.

Sin embargo, para presiones de funcionamiento más altas del motor, la tensión de ruptura requerida para iniciar la descarga entre los electrodos del elemento de encendido es significativamente mayor que en motores que funcionan a presiones convencionales. Esto crea problemas para los TSI, como para cualquier bujía. Los electrodos en un TSI, como en una bujía convencional, se mantienen en una relación separada por un elemento denominado aislador, que está formado por un material aislante tal como cerámica. La tensión de ruptura más alta provoca problemas tanto
45 para el aislador como para los electrodos.

A lo largo de la superficie del aislador que se extiende entre los electrodos, la tensión de ruptura es menor que a lo largo de los electrodos en un TSI o en cualquier bujía convencional con una distancia similar entre los electrodos. De hecho, esta diferencia en las tensiones de ruptura varía directamente con el aumento de la presión en la cámara de combustión. En consecuencia, aunque la tensión de ruptura a lo largo de la superficie del aislador aumenta con la presión, ese aumento es menor que el aumento de la tensión de ruptura entre la parte expuesta de los electrodos lejos de la superficie del aislador. Cuando se produce una ruptura (como resultado de lo cual la resistencia a través del plasma disminuye rápidamente), la corriente aumenta rápidamente y se conduce una corriente muy grande en el plasma en formación a lo largo de la superficie del aislador, dando lugar de ese modo a la fuerza de Lorentz que actúa sobre el plasma. Sin embargo, tal corriente que aumenta rápidamente no sólo crea un plasma de muy alta temperatura, sino también una poderosa onda de choque en las proximidades de la superficie del aislador. Cuanto mayor es la corriente, más rápida es la expansión del plasma y la onda de choque resultante. Estos efectos combinados pueden provocar deformación y/o rotura del aislador.

Además, la alta corriente produce una erosión muy rápida de los electrodos en las proximidades de la superficie del aislador, donde son atacados por la alta corriente, el calentamiento térmico y la emisión termoiónica que resulta de ello.

Se han manifestado problemas similares con elementos de encendido basados en el diseño de "bujía de riel" de la Universidad de Texas, que genera una fuerza de Lorentz en un plasma que se desplaza a lo largo de una distancia de descarga con una relación de aspecto alta (a diferencia de un TSI, que tiene una distancia de descarga con una

relación de aspecto baja).

Aunque tanto la bujía de riel como el TSI generan un movimiento de plasma significativo a presiones relativamente bajas, cuando la presión de la cámara de combustión aumenta hasta una presión alta, el plasma se comporta de manera diferente y es esta diferencia en el comportamiento la que conduce a resultados insatisfactorios. En un entorno de baja presión, la fuerza que la presión ejerce sobre el plasma es relativamente pequeña. El plasma se mueve fácilmente a lo largo de los electrodos en respuesta a la fuerza de Lorentz. Sin embargo, a medida que aumenta la presión de la cámara de encendido, esa presión proporciona una fuerza de magnitud significativa que resiste la fuerza de Lorentz y, por tanto, el movimiento del plasma. Como consecuencia, el plasma tiende a concentrarse más y a colapsar sobre sí mismo; en lugar de tener una nube de plasma difusa, se forma un plasma muy localizado (un arco) entre los electrodos por debajo de un determinado umbral de corriente. Este arco, aunque ocupa un volumen mucho menor que la nube de plasma del caso de baja presión, recibe una energía similar. Como resultado, la densidad de corriente es mayor y en los electrodos, donde existe el arco, hay una temperatura localizada más alta y más densidad de potencia en las superficies de contacto arco-electrodo. Es decir, la densidad de corriente es bastante alta en esas superficies de contacto, lo que produce un calentamiento más localizado de los electrodos que en el entorno de baja presión. El calentamiento localizado de los electrodos, a su vez, produce emisión termiónica de electrones e iones. El efecto observado es que el arco parece "unirse" en ubicaciones relativamente fijas en los electrodos, produciendo la erosión de los electrodos a medida que toda la energía de descarga se deposita en el "punto de unión"; esto debe contrastarse con el entorno de baja presión donde un área de contacto de plasma difusa y de menor densidad se mueve a lo largo de los electrodos sin dañarlos significativamente.

Al mismo tiempo, el plasma, afectado por las fuerzas de Lorentz y térmicas, se desvía de los puntos de unión del arco. Esto hace que las líneas de campo magnético ya no sean ortogonales al flujo de corriente entre los electrodos, lo que reduce la magnitud de la fuerza de Lorentz producida por una corriente dada. Por tanto, además de otros problemas, hay una pérdida en la fuerza motriz aplicada al plasma.

En general, hay una reducción en el movimiento del plasma en comparación con los entornos de menor presión y un desgaste de electrodos notablemente aumentado en los puntos de unión del arco.

Por consiguiente, existe una variedad de necesidades, incluyendo necesidades de generadores de plasma, en general, necesidades de sistemas de encendido mejorados, necesidades de sistemas de encendido para su uso en motores de combustión interna y necesidades de un sistema y método de encendido que genere un núcleo de encendido grande y que pueda usarse con motores de alta presión y que sea comercialmente práctico.

Si va a usarse un elemento de encendido de chispa móvil en un entorno de combustión a alta presión, existe además la necesidad de superar los efectos negativos anteriores sobre el material aislante y los electrodos del elemento de encendido. Véanse las patentes estadounidenses n.ºs 5704321, 6131542, 6321733, 6474321, 6662793 y 6553981, por ejemplo. Es decir, existe la necesidad de un elemento de encendido y un sistema de encendido para su uso en motores de combustión de alta presión, en los que el aislador y los electrodos muestren una vida útil sustancial (preferiblemente comparable a la de las bujías convencionales en motores de baja presión) sin que se destruyan por el proceso de descarga. De manera deseable, un elemento de encendido de chispa móvil y un sistema de encendido de este tipo podrán usarse y serán útiles en motores de combustión interna que funcionen no sólo a presiones altas y muy altas (es decir, de varios cientos de psi), sino también a presiones convencionales más bajas.

El documento GB-A-2 085 076 divulga un sistema de encendido por plasma para un motor de combustión interna que comprende un condensador de almacenamiento de energía, una pluralidad de unidades de conmutación y transformadores elevadores, uno para cada cilindro del motor. Cuando cada unidad se activa en secuencia mediante las señales procedentes de un sensor de ángulo de cigüeñal, se genera una alta tensión en la bobina secundaria del transformador elevador mediante la descarga del condensador a través de un circuito resonante que incluye la bobina primaria y el condensador auxiliar para generar una chispa entre los electrodos del enchufe. Posteriormente se hace pasar una gran corriente a través de los electrodos mediante la descarga de la energía restante almacenada en el condensador a través de la bobina secundaria, por lo que se produce un plasma en el espacio de descarga entre los electrodos de las bujías.

El documento US 4.841.925 A divulga un sistema de encendido para combustibles de hidrocarburos basado en parte en el principio de "encendido por descarga de llama" de acoplar la energía de encendido al plasma del frente de llama inicial ya sea como un "encendido por descarga de llama pulsante" o un "encendido por descarga convencional potenciada". Las propiedades eléctricas, geométricas, de chispa y de descarga de plasma del frente de llama de hidrocarburos se tienen en cuenta y se ajustan o se adaptan para crear un proceso de encendido por descarga de llama capaz de encender mezclas muy pobres. El sistema se mejora adicionalmente modificando las propiedades del plasma del frente de llama del combustible aumentando la razón del contenido de carbono con respecto al de hidrógeno (C/H) del combustible y/o usando aditivos para aumentar adicionalmente la densidad del plasma del frente de llama sin reducir el coeficiente de recombinación del plasma.

Sumario de la invención

Se abordan las necesidades anteriores y otras, y se proporcionan ventajas, con un nuevo método y el aparato correspondiente, para generar y mantener un plasma, hacer funcionar un elemento de encendido de chispa móvil y proporcionar un encendido para motores de combustión interna y otros motores, particularmente motores de combustión interna de alta presión. Normalmente, se aplica una alta tensión de ruptura inicial al elemento de encendido para iniciar un núcleo de plasma en una región de iniciación de plasma del elemento de encendido, pero preferiblemente a una corriente menor que la empleada anteriormente con los encendidos de TSI, ya que la corriente de ruptura no necesita producir una gran fuerza de Lorentz. Después del impulso de corriente de ruptura, pueden emplearse diversos mecanismos para prolongar el plasma mientras se produce la recombinación y para permitir que el plasma se desprenda (o pueda desprenderse) fácilmente de la región de iniciación (normalmente, sobre o adyacente a la superficie de un aislador entre los electrodos del elemento de encendido. Antes de que el plasma tenga la oportunidad de recombinarse completamente, la corriente se activa nuevamente para proporcionar un corto impulso de energía de seguimiento (preferiblemente a una corriente sustancialmente menor que la del impulso de ruptura). El impulso de corriente de seguimiento genera un impulso correspondiente de fuerza de Lorentz para alejar el plasma de su ubicación anterior, más a lo largo de los electrodos del elemento de encendido. Pueden proporcionarse varios de tales impulsos de seguimiento, con un intervalo de apagado entre impulsos sucesivos, intervalo durante el cual uno o más mecanismos prolongan el plasma y permiten sólo una recombinación parcial del plasma. Esto se denomina "retención". Antes de la recombinación total del plasma, el siguiente impulso de corriente de seguimiento "empuja" el plasma adicionalmente a lo largo de los electrodos; y el impulso de seguimiento final expulsa el plasma de los electrodos. Un mecanismo para producir retención es reducir la corriente a través del elemento de encendido hasta un nivel relativamente bajo (pero distinto de cero), denominado "corriente de retención". Alternativamente, si no se aplica una corriente de retención, pueden obtenerse efectos similares usando cualquiera de otras técnicas diversas para prolongar la recombinación y prevenir la recombinación "total" del núcleo de plasma cuando llegue el momento del siguiente impulso de seguimiento. Por ejemplo, los impulsos de seguimiento pueden cronometrarse y posiblemente incluso tener forma de onda para que se sigan más estrechamente entre sí de modo que sólo se produzca una recombinación parcial entre los impulsos; o cada impulso de seguimiento puede ir precedido por una tensión de sub-ruptura elevada; o el plasma puede excitarse mediante energía de RF o láser. Es decir, se contemplan numerosas formas de prevenir la recombinación total del plasma. Por "total" en referencia a la recombinación se entiende que el plasma efectivamente se ha extinguido y se necesita alta energía para volver a encenderlo.

La invención se manifiesta de varias maneras, o aspectos, y a continuación se presentan implementaciones de ejemplo. Otras formas de poner en práctica la invención resultarán evidentes para los expertos en la técnica. Los diversos aspectos pueden ponerse en práctica solos o en cualquiera de muchas combinaciones, no pudiendo enumerarse todas ellas de manera razonable en el presente documento. Se pretende que las características de diversas realizaciones se pongan en práctica en combinaciones distintas a las ilustradas, no mostrándose todas las características en relación con todas las realizaciones, por motivos de brevedad.

La presente invención proporciona un método de generación de plasma según la reivindicación 1.

Breve descripción de los dibujos

No se pretende que los dibujos adjuntos estén dibujados a escala. En los dibujos, cada componente idéntico o casi idéntico que se ilustra en diversas figuras está representado por un número igual. Por motivos de claridad, es posible que no todos los componentes estén etiquetados en cada dibujo. En los dibujos:

La figura 1 es una ilustración esquemática, en sección transversal, de un elemento de encendido de chispa móvil de la técnica anterior, que ilustra el principio de su funcionamiento;

la figura 2 es un diagrama en parte esquemático y en parte de bloques de un circuito de encendido típico de la técnica anterior para el TSI de la figura 1;

la figura 3 es una representación generalizada de la tensión entre los electrodos de un elemento de encendido tal como se muestra en la figura 1, usando un circuito de encendido del tipo mostrado en la figura 2;

la figura 4 es una ilustración esquemática de la creación de una nube de plasma mediante un impulso de corriente en un TSI, y el posterior colapso del plasma, en un TSI que funciona en un entorno de alta presión;

la figura 5 es una forma de onda de un ejemplo de una corriente de accionamiento aplicada a un TSI según las enseñanzas de la presente invención;

las figuras 5 y 7 son ilustraciones esquemáticas del movimiento de la nube de plasma de la figura 4 en un TSI que se hace funcionar según los principios ejemplificados en la forma de onda de la figura 5;

la figura 8 es un diagrama de circuito esquemático simplificado para un ejemplo de un circuito de accionamiento de

encendido que puede usarse para generar una forma de onda de accionamiento de corriente para un TSI tal como se enseña en el presente documento, que incluye, por ejemplo, la forma de onda o señal de accionamiento de la figura 5;

5 la figura 9 es un diagrama de circuito simplificado en parte de bloques y en parte esquemático de otro circuito de encendido para generar un accionamiento de encendido para un TSI tal como se enseña en el presente documento;

10 La figura 10 es un diagrama de circuito simplificado en parte de bloques y en parte esquemático de aún otro circuito de encendido para generar un accionamiento de encendido para un TSI tal como se enseña en el presente documento; y

La figura 11 es un diagrama de circuito simplificado en parte de bloques y en parte esquemático de un circuito de encendido para generar un accionamiento de encendido para un TSI tal como se enseña en el presente documento.

15 Descripción detallada

En el presente documento se explican con mayor detalle numerosos aspectos de la invención; los problemas abordados por la invención, con mayor detalle que anteriormente; y una única realización de un ejemplo de un circuito de encendido no según la invención.

20 Según un primer aspecto, se mostrará un método para hacer funcionar un elemento de encendido en un motor de combustión interna, que comprende: aplicar una alta tensión a los electrodos del elemento de encendido, siendo dicho alta tensión de amplitud suficiente para hacer que se produzca una ruptura por descarga eléctrica entre los electrodos, en una región de iniciación (por ejemplo, sobre una superficie de un aislador) entre los electrodos, dando
25 como resultado una descarga eléctrica de alta corriente en el elemento de encendido y la formación de un núcleo de plasma en una mezcla de aire o combustible-aire adyacente a dicha superficie; y después de la ruptura, aplicar a dichos electrodos (preferiblemente una corriente de retención) y una secuencia de uno o más impulsos de tensión más baja y corriente más baja, mediante lo cual el núcleo de plasma se fuerza a moverse hacia un extremo libre de dichos electrodos mediante dichos impulsos de tensión más baja, corriente más baja.

30 Entre la ruptura y un primer impulso de la secuencia, y entre los impulsos de la secuencia, es deseable que se mantenga una corriente a través del núcleo de plasma suficiente para impedir la recombinación total del plasma. Alternativamente, no es necesario mantener tal corriente, si los intervalos entre la ruptura y el primer impulso de la secuencia, y entre los impulsos de seguimiento adicionales de la secuencia, son suficientemente cortos, de manera
35 que no se produzca una recombinación total antes del inicio de tales impulsos. (Si se produce recombinación total, entonces se necesita una alta tensión de ruptura para reiniciar el proceso de formación de plasma). Si se evita la recombinación total (no importa cómo) antes del inicio de un impulso de seguimiento, el impulso de seguimiento puede ser un impulso de corriente relativamente baja (en comparación con varios enfoques anteriores, pero todavía apreciable) y proporcionará todavía una fuerza de Lorentz adecuada para hacer avanzar el plasma, y él mismo
40 creará un arco de corriente que puede moverse a lo largo de los electrodos. Como otra alternativa, la recombinación puede ralentizarse imponiendo una tensión relativamente alta (pero menor que la de ruptura) a través de los electrodos antes del inicio de un impulso de seguimiento. Los tres mecanismos facilitan el establecimiento de un núcleo de plasma móvil sin requerir la regeneración de una condición de ruptura de alta energía, lo que reduce la tendencia de la trayectoria de corriente a "volverse a unir" a los electrodos en ubicaciones fijas. El número de
45 impulsos de seguimiento varía según los requisitos de diseño y/o las condiciones de funcionamiento.

El elemento de encendido es preferiblemente un elemento de encendido de chispa móvil.

50 Deseablemente, un primer impulso de la secuencia sigue a la descarga de ruptura en un intervalo de aproximadamente 2 hasta aproximadamente 100 microsegundos, de manera preferible desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 20 microsegundos, pero esto dependerá del tiempo de recombinación para un plasma en el tipo particular de mezcla de combustible que está empleándose. De manera deseable, cada uno de dichos impulsos de seguimiento tiene una amplitud máxima de aproximadamente 5 - 200 amperios. Pero no es necesario que las amplitudes sean uniformes. Preferiblemente, dichos impulsos de tensión más baja y corriente más baja tienen una
55 amplitud máxima de aproximadamente 25-105 amperios, y de manera más preferible de aproximadamente 40-80 amperios. Los impulsos pueden tener una duración de aproximadamente 2 a aproximadamente 200 microsegundos. Los impulsos sucesivos en dicha secuencia preferiblemente están separados por intervalos de aproximadamente 10-500 microsegundos e incluso más preferiblemente, 40-120 microsegundos, pero los intervalos pueden no ser uniformes. En lo que se refiere a la tensión, cada uno de dichos impulsos normalmente puede tener una amplitud de
60 aproximadamente 50-5000 V y, de manera más preferible, de aproximadamente 300-500 V. No es necesario que todos los impulsos tengan la misma polaridad de tensión o corriente; y no es necesario que ni la tensión ni la corriente en un impulso sean constantes. Los números anteriores son todos representativos únicamente y no pretenden reflejar ningún límite inherente a la invención. Pueden emplearse otros intervalos en realizaciones apropiadas. Sin embargo, estos números pueden ser útiles como ayuda para identificar diferencias con otros
65 sistemas y métodos de encendido.

La invención está destinada a su uso en motores de alta presión, pero no se limita a ello.

Según un ejemplo, no según la invención, se proporciona un circuito de encendido para alimentar un elemento de encendido en un motor de combustión interna, comprendiendo el circuito medios para proporcionar una alta tensión capaz de provocar una descarga de ruptura, a una corriente relativamente alta (pero preferiblemente más baja que la que han usado los encendidos de TSI anteriores), entre los electrodos de un elemento de encendido, y en una región de iniciación (por ejemplo, en o sobre una superficie de un aislador que separa los electrodos), cuando dicho elemento de encendido está dispuesto en una mezcla de combustible-aire, por lo que se forma un núcleo de plasma adyacente a dicha superficie mediante dicha descarga; y medios para proporcionar una secuencia de uno o más impulsos de seguimiento de tensión relativamente más baja y corriente más baja que tienen una amplitud y temporización de corriente y tensión suficientes para crear impulsos de fuerza de Lorentz que hacen que el núcleo de plasma se mueva hacia un extremo libre de dichos electrodos mediante dichos impulsos de seguimiento. Los medios para proporcionar una alta tensión capaz de provocar la ruptura pueden incluir una bobina de encendido de baja inductancia y alta tensión que tiene un devanado primario y un devanado secundario, teniendo el devanado secundario un cable para conexión a un electrodo de un elemento de encendido, y un circuito para activar una señal en el devanado primario para inducir un impulso de alta tensión en el devanado secundario.

Los medios para proporcionar una secuencia de impulsos de tensión relativamente más baja (es decir, tensión de sub-ruptura) pueden comprender una fuente de tensión baja y, para cada impulso, un condensador cargado por la fuente de tensión baja y un transformador de impulsos que tiene un primer devanado conectado a dicho cable y un segundo devanado a través del cual se descarga el condensador en respuesta a una señal de activación, induciendo dicho impulso en dicho cable. El circuito de encendido puede incluir además medios para proporcionar al elemento de encendido, en un intervalo entre la descarga de ruptura y un primer impulso de tensión más baja, una corriente de retención suficiente para impedir la recombinación total del núcleo de plasma en dicho intervalo. También puede incluir medios para proporcionar al elemento de encendido, en un intervalo entre impulsos de seguimiento sucesivos, una corriente de retención suficiente para impedir la recombinación total del núcleo de plasma en dicho intervalo. Alternativamente, los medios para proporcionar una secuencia de impulsos de tensión relativamente baja incluyen medios para proporcionar impulsos separados en el tiempo por un intervalo suficientemente corto para que no se produzca la recombinación total del núcleo de plasma en dicho intervalo. Como otra alternativa, los medios para proporcionar una secuencia de impulsos de tensión relativamente baja pueden comprender un medio para preceder cada uno de tales impulsos de seguimiento con una tensión de sub-ruptura alto.

Según un aspecto adicional, se muestra un circuito de encendido para alimentar un elemento de encendido en un motor de combustión interna, comprendiendo el circuito un generador de impulsos de alta tensión que genera en una salida para conexión a un elemento de encendido un impulso cuya tensión máxima, cuando se suministra al elemento de encendido es capaz de provocar una descarga de ruptura, a una corriente alta, en una región de iniciación entre los electrodos del elemento de encendido (por ejemplo, adyacente a una superficie de un aislador que separa los electrodos), cuando dicho elemento de encendido está dispuesto en una mezcla combustible-aire, por lo que se forma un núcleo de plasma adyacente a dicha superficie mediante dicha descarga; y un generador de impulsos de tensión baja que genera en la salida una secuencia de uno o más impulsos de tensión más baja y corriente más baja que tienen amplitud y temporización de tensión y corriente suficientes para forzar al núcleo de plasma a moverse hacia un extremo libre de dichos electrodos mediante dicha tensión más baja, impulsos de corriente más bajos. El circuito de encendido puede incluir además una fuente de corriente de retención que suministra en la salida, en un intervalo entre la descarga de ruptura y un primer impulso de tensión más baja, una corriente de retención suficiente para evitar la recombinación total del núcleo de plasma en dicho intervalo. Alternativamente, el circuito puede incluir un generador de impulsos de seguimiento que suministra, en la salida, impulsos de seguimiento que se suceden tan estrechamente (es decir, que están separados por un intervalo suficientemente corto) que no se produce la recombinación total del plasma en el intervalo entre tales impulsos. Como otra alternativa, el circuito puede incluir una fuente de impulsos que proporcione una secuencia de impulsos de tensión relativamente baja y una fuente de alta tensión que proporcione, antes de cada uno de tales impulsos de seguimiento, una alta tensión de sub-ruptura suficiente para retrasar la recombinación total de manera que la recombinación total no se ha producido cuando comienza el impulso de tensión relativamente baja.

Es útil ahora intentar comprender mejor los problemas que se encuentran cuando se intenta hacer funcionar un elemento de encendido en un motor de alta presión. Un elemento de encendido de chispa móvil (TSI) es un dispositivo de encendido que tiene la naturaleza de una pequeña pistola de plasma. En la figura 1 se ilustra un TSI típico, tomado de la patente estadounidense n.º 6.321.733. Un material del aislador 14 (por ejemplo, cerámica) mantiene la separación de los electrodos. Se crea un plasma 16 a lo largo de la superficie del aislador, debido a un proceso de ruptura de alta tensión que se produce en ella. A medida que la corriente de descarga pasa a través del plasma, la temperatura y el volumen del plasma aumentan, lo que conduce a una disminución adicional de la resistividad y la resistencia del plasma. Esto aumenta la corriente en el plasma, que está limitada principalmente por la impedancia del circuito de descarga eléctrica que produce la corriente suministrada al elemento de encendido.

En la figura 2 se muestra un circuito de encendido típico para hacer funcionar un TSI, que también está tomado de la patente estadounidense n.º 6.321.733. El circuito consiste en dos partes principales: (1) un sistema 42 de encendido convencional y (2) un generador de corriente de seguimiento que comprende condensadores tales como 46 y 48,

una fuente 44 de alimentación de tensión baja y un diodo 50. El sistema 42 de encendido convencional proporciona una tensión alta para crear una ruptura (a una corriente alta) en la distancia de salto de chispa a lo largo de la superficie 56 de aislador entre los electrodos 18 y 20, para formar un plasma inicial en la mezcla de combustión gaseosa cerca de esa superficie. El generador de corriente de seguimiento proporciona una corriente a través del plasma inicial, en la distancia de salto de chispa, después de la descarga de ruptura, formando un volumen de plasma mucho mayor. La resistencia 54 puede usarse (pero no es necesario) para limitar la corriente máxima del condensador 48. En la figura 3 se muestra un perfil de descarga de tensión típico (no a escala), tomado de la patente estadounidense n.º 6.474.321.

El sistema 42 de encendido convencional inicia la descarga en la distancia de descarga en el momento $t = t_0$. Como resultado, la tensión en una bobina secundaria en el transformador de encendido de alta tensión (HV) aumenta hasta que alcanza la tensión de ruptura en la distancia de salto de chispa en $t = t_1$. Después de que se produzca la ruptura en $t = t_1$, la tensión a través de la distancia de descarga disminuye rápidamente hasta un valor de aproximadamente 500 voltios o menos en $t = t_2$, correspondiente a una baja resistividad del plasma. La tensión es sustancialmente constante hasta un momento $t = t_3$, cuando se ha transferido aproximadamente toda la energía de los condensadores 46 y 48, después de lo cual la tensión y la corriente disminuyen rápidamente hasta un valor cercano a cero en el tiempo $t = t_4$. Por motivos de simplicidad, se supondrá que el intervalo desde t_3 hasta t_4 es insignificamente corto. El intervalo $\Delta = t_3 - t_2$ se refiere a la energía almacenada en los condensadores 46 y 48, así como a la tensión de la corriente de seguimiento a través de la distancia de descarga después de que se haya producido la ruptura. La siguiente ecuación de balance energético relaciona las variables:

$$\frac{1}{2} C (V_{t_2}^2 - V_{t_4}^2) = \int_{t_2}^{t_4} V(t) i(t) dt$$

donde $V(t)$ es la tensión en función del tiempo, entre los electrodos que definen la distancia de descarga, teniendo tal tensión un valor inicial V_{t_2} en el momento t_2 y un valor final $V_{t_4} \approx 0$ en $t > t_4$, $i(t)$ es la corriente en la distancia de salto de chispa en función del tiempo y C es la suma de las capacitancias de descarga (en este caso, la suma de las capacitancias de los condensadores 46 y 48). En el intervalo de tiempo $\Delta t = t_3 - t_2$, puede suponerse, como primera aproximación, que $V(t) \approx V_0$ y es aproximadamente constante, por tanto, $V_{t_2}^2 - V_{t_4}^2 \approx V_0^2$. Si se supone además que la resistividad del plasma es constante, puede suponerse que $i(t) \approx i_0$. Pueden usarse estos supuestos de simplificación para obtener una relación básica entre Δt ($\Delta t \approx t_4 - t_2$ porque $t_4 - t_3 \ll \Delta t$) y los parámetros del circuito descritos por C , V_0 , e i_0 :

$$\Delta t = CV_0 / 2i_0$$

Esta relación simple proporciona información sobre la duración del impulso en función de la capacitancia y la corriente promedio i_0 durante la descarga, para una tensión de funcionamiento dada (relativamente baja) V_0 en los condensadores. Para una energía dada proporcionada al elemento de encendido (por tanto, dados V_0 y C), esta relación enseña que para que la corriente i_0 aumente, la duración del impulso Δt tiene que disminuir. Sin embargo, el aumento de la corriente i_0 también aumenta la fuerza de Lorentz F_L . El aumento de la fuerza de Lorentz aleja el plasma de la superficie del aislador más rápidamente, hacia el extremo de los electrodos, hacia la cámara de combustión del motor. Sin embargo, la presión en la cámara de combustión proporciona una fuerza de presión compensatoria F_p en el elemento de encendido. La fuerza F_p trabaja contra la fuerza de Lorentz impidiendo que la velocidad del plasma aumente por encima de algún valor límite, independiente de la longitud l de los electrodos (es decir, l es la distancia entre la superficie del aislador y el extremo libre de los electrodos orientados hacia la cámara de combustión).

La fuerza neta disponible para mover el plasma es la diferencia entre la fuerza de Lorentz F_L y la fuerza de presión F_p (suponiendo que se pueda ignorar la fuerza térmica sobre el plasma, ya que es significativa solo en las primeras etapas de propagación del plasma y disminuye rápidamente a medida que el plasma se aleja de la superficie del aislador). Es útil desarrollar un modelo de las fuerzas con el fin de entender cómo superar la fuerza de presión. La fuerza de Lorentz F_L puede representarse como una presión magnética p_B sobre el plasma, dada por la relación bien conocida $p_B = B^2 / 8\pi$, multiplicado por el área superficial efectiva del plasma, S_{pt} :

$$F_L = \frac{B^2}{8\pi} S_{pt}$$

La fuerza de presión del gas F_p puede presentarse en la forma $F_p = p S_{pt}$, donde p es la presión efectiva del gas de la mezcla de combustión (frente al plasma durante su movimiento). Por tanto, puede escribirse la ecuación para la fuerza neta que rige el movimiento del plasma y puede presentarse como:

$$(F_L - F_p) = m_{pt} \cdot dv_{pt}/dt,$$

Dónde v_{pt} es la velocidad del plasma y m_{pt} es la masa plasmática. A su vez, la masa plasmática puede presentarse como el producto de la densidad de masa plasmática ρ_{pt} y volumen plasmático $V_{pt} = S_{pt} \Delta \ell_{pt}$, donde $\Delta \ell_{pt}$ es una fracción que representa la porción de la longitud del electrodo ocupada momentáneamente por el plasma.

La ecuación de la fuerza neta puede simplificarse y de ella pueden derivarse relaciones útiles haciendo algunas suposiciones aproximadas. Puede suponerse que el volumen de plasma, después de su formación, es constante a medida que el plasma se propaga a lo largo de los electrodos; por tanto, S_{pt} , $\Delta \ell_{pt}$ y ρ_{pt} son constantes y las fuerzas F_L y F_p también son constantes. Luego integrando se obtiene:

$$(F_L - F_p) \Delta t \approx \rho_{pt} \Delta \ell_{pt} S_{pt} v_{pt},$$

donde se supuso que la velocidad inicial del plasma v_{i0} era mucho menor que su velocidad final, v_{pt} .

Reemplazando F_L por B^2 donde

$$B = \sqrt{8\pi\alpha i}$$

y α es un coeficiente constante, y F_p es igual que anteriormente, se obtiene:

$$(\alpha i_0^2 - p) \Delta t = \rho_{pt} \Delta \ell_{pt} v_{pt}.$$

Porque $\frac{1}{2} \Delta t v_{pt} \approx \ell$, puede escribirse

$$\Delta t = \frac{1}{i_0} \left(\frac{2\ell \rho_{pt} \Delta \ell_{pt} / \alpha}{1 - p / \alpha i_0^2} \right)^{1/2}$$

A partir de esta ecuación, se observa que para presiones relativamente pequeñas (es decir, $p \ll \alpha i_0^2$), $\Delta t i_0 \approx$ constante; y en este intervalo de parámetros, el aumento de i_0 conduce a la disminución de Δt . Luego, a partir de las relaciones anteriores, puede establecerse que el plasma puede moverse más rápido al aumentar i_0 sin aumentar realmente la energía de descarga (por supuesto, esto sólo es cierto para $\rho_{pt} \Delta \ell_{pt} \approx$ constante; al aumentar i_0 , $\rho_{pt} \Delta \ell_{pt}$ también puede aumentar, por lo que es posible que se requiera algo de energía adicional).

Sin embargo, cuando no es cierto que $p \ll \alpha i_0^2$ (es decir, la suposición falla), entonces el aumento de la presión p podría conducir a $p / \alpha i_0^2 \geq 1$ y el plasma podría dejar de moverse por completo. En tal caso, será necesario aumentar i > i_0 hasta el punto de que $p / \alpha i^2 < 1$. Sin embargo, esto requiere un aumento significativo de energía, debido al aumento de Δt e i .

Los procesos de recombinación en el plasma plantean un obstáculo adicional. La parte frontal del plasma caliente que está en contacto con una mezcla de combustión relativamente fría se enfría rápidamente. La tasa de recombinación del plasma a alta presión es función de la temperatura del plasma, T , que varía como $1/T^{3/2}$. Por tanto, a baja temperatura, la recombinación del plasma se produce muy rápidamente en su frente de propagación, donde interacciona con la mezcla gaseosa fría. A altas presiones, tal tasa de recombinación podría ser tan rápida como la velocidad de propagación del plasma, lo que significa que el movimiento inducido por la fuerza de Lorentz sería completamente anulado por la velocidad de recombinación, haciendo efectivamente que el plasma se detuviera. En tal situación, la velocidad neta del plasma a lo largo de los electrodos es sustancialmente cero y el plasma parecerá permanecer cerca de la superficie del aislador durante toda la descarga. El plasma, por supuesto, también se recombina cerca de la superficie del aislador, aunque a un ritmo mucho más lento porque el gas allí está mucho más caliente que en el borde frontal del plasma. En consecuencia, la resistividad del plasma cerca de la superficie del aislador es menor que en el borde frontal del plasma y la mayor parte de la corriente de descarga se concentrará en esa región, evitando una mayor recombinación del plasma cerca del aislador.

Como se muestra anteriormente, aumentar la presión de funcionamiento de la cámara de combustión reduce la fuerza motriz neta sobre el plasma, por lo que se mueve más lentamente y, por tanto, aumenta el tiempo que tarda el plasma en moverse hacia la cámara de combustión. Por tanto, para presiones suficientemente grandes, es posible que el plasma nunca alcance al final del elemento de encendido.

Para evitar que el plasma se ralentice tanto, es necesario elevar la corriente de descarga para aumentar la energía

que se alimenta al plasma. Sin embargo, el aporte de energía aumentado se concentra cerca del aislador. Eso es bastante problemático. Se imponen tensiones térmicas al aislador y se generan ondas de choque que pueden dañar el aislador. También hay grandes efectos térmicos en las partes de los electrodos cercanas al aislador. Suponiendo que el circuito de encendido suministra suficiente energía para crear una fuerza neta que mueva efectivamente el plasma, entonces cuanto mayor sea la presión en la cámara de combustión, peores serán los efectos negativos sobre el aislador y los electrodos. Estas condiciones disminuyen la longevidad del aislador y del electrodo en entornos de alta presión, a menos que se haga algo para evitar esos impactos negativos.

El problema de disminuir la longevidad de los elementos de encendido de chispa móvil al aumentar la presión del gas (es decir, la mezcla de combustión) disminuye significativamente, o incluso se elimina, al menos en parte, al disminuir la diferencia entre la velocidad de recombinación en la parte frontal del plasma (orientada hacia la cámara de combustión) y la parte posterior del plasma (orientada hacia el aislador). Al hacer que la recombinación del plasma sea más simétrica, se dirige una fuerza neta significativa sobre el plasma hacia la cámara de combustión.

La figura 4 ilustra esquemáticamente el problema. Un primer impulso de corriente relativamente corto forma un volumen de plasma 42, tal como se indica mediante la línea discontinua. Durante ese primer impulso, el centro del plasma se mueve hacia la derecha, alejándose del aislador 14, bajo la influencia de la fuerza de Lorentz. Como el impulso tiene una duración relativamente corta, ni la superficie del aislador ni el gas cerca de la superficie se calientan significativamente. Por tanto, después de que termina el primer impulso de corriente, el plasma se recombina en su lado posterior (izquierdo) y en su lado frontal (derecho) de manera bastante simétrica, dejando un núcleo 44 de plasma relativamente estrecho. El núcleo de plasma estrecho todavía puede soportar un arco, tal como se explicó anteriormente.

La presente invención mejora la simetría de la recombinación del plasma mediante el uso de un enfoque diferente para energizar el elemento de encendido. Se aplican varias ráfagas cortas de descarga de corriente (impulsos de seguimiento) después del impulso de ruptura, entre los tiempos t_2 y t_3 . Los impulsos de seguimiento tienen una amplitud de corriente pico moderadamente alta, pero significativamente menor que el impulso de ruptura. Entre el impulso de ruptura y el primer impulso de seguimiento, y entre los impulsos de seguimiento, la corriente (de retención) se mantiene preferiblemente en un valor bajo, distinto de cero, para evitar la recombinación total.

En la figura 5, en la que se muestra la forma de onda para un ejemplo de una corriente de elemento de encendido que puede usarse para excitar un TSI tal como se explicó anteriormente, la ruptura se produce en el tiempo t_1 (tensión pico, seguido de corriente máxima) y se completa en el momento t_1^* . A partir del momento t_2 , se proporciona una serie de (uno o más) impulsos de corriente de menor amplitud 52A - 52E (es decir, cinco impulsos, en este ejemplo, aunque el número de impulsos es variable) entre los electrodos del elemento de encendido. El intervalo de descarga finaliza en el momento t_3 , cuando el plasma alcanza el final de los electrodos. El plasma comenzó en el aislador en el momento t_1 . Las duraciones $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ de los respectivos impulsos 52 y su magnitud de corriente pico, i_0 , deben elegirse según el diseño del elemento de encendido y la presión del gas p . En un elemento de encendido de chispa móvil, las duraciones y magnitudes de los impulsos se seleccionan, preferentemente, según la longitud de los electrodos y la distancia entre ellos. La experimentación es un modo satisfactorio, y por el momento probablemente el mejor modo, de establecer los valores de esos parámetros para un diseño de elemento de encendido determinado y una presión máxima de funcionamiento.

El tiempo entre impulsos también depende del diseño y la presión del elemento de encendido. El tiempo entre la corriente de ruptura, cuando alcanza un nivel cercano a cero en t_1^* y el primer impulso 52A de seguimiento, indicado como $\Delta t_{b,1}$, depende de la tensión de ruptura y de las características específicas del aislador entre los electrodos. La corriente de retención i_s es distinta de cero y, como tal, ayuda a evitar la recombinación total del plasma; de lo contrario, se necesitaría una tensión alta (comparable a la tensión de ruptura) para iniciar el siguiente impulso. Entonces, la corriente i_s facilita cada impulso de subsecuencia y permite su formación sin necesidad de un impulso de ruptura adicional. La siguiente tabla proporciona valores de parámetros que han resultado útiles con elementos de encendido TSI que funcionan en una cámara de combustión simulada a una presión de 400 psi:

Longitud del electrodo: $l = 2,5$ mm

Corriente del impulso pico: $i_0 \approx 20 - 40$ Amperios,

Duración de k - impulso: $\tau_k \approx 10 - 20$ microsegundos,

Tiempo entre dos impulsos consecutivos k y k + 1: $\Delta t_{k,k+1} \approx 50 - 100$ microsegundos,

n (es decir, número de impulsos) ≈ 3 a 4,

Corriente de retención: $i_s \approx 1 - 3$ Amperios,

Tiempo entre el final de la ruptura y el primer impulso de seguimiento: $\Delta t_{b,1} \approx 5 - 20$ microsegundos.

Estos parámetros pueden ser significativamente diferentes para diferentes diseños de bujías o valores de presión p . Por ejemplo, para un TSI similar al del ejemplo anterior y que funciona a una presión $p = 900$ psi, los parámetros adecuados que se han encontrado útiles son:

$i_0 \approx 60 - 80$ Amperios,

$\tau_k \approx 20 - 40$ microsegundos,

$\Delta t_{k,k+1} \approx 30 - 40$ microsegundos,

$n \approx$ de 7 a 10 impulsos,

$i_s \approx 3 - 5$ Amperios, y

$\Delta t_{b,1} \approx 3 - 10$ microsegundos.

Aunque los valores de impulso pico i_0 y las duraciones de impulso τ_k y los tiempos entre impulsos individuales $\Delta t_{k,k+1}$ se han mostrado como constantes, no es necesario que sean uniformes o constantes. Por ejemplo, en realidad podrían aumentar o disminuir en función del tiempo.

Las figuras 6 y 7 ilustran esquemáticamente el funcionamiento producido por este esquema de accionamiento por impulsos. Se supone que el impulso de ruptura ya se ha producido y el primer impulso de seguimiento está en una posición Δl_1 lejos de la superficie del aislador, como en la figura 4. Después de un intervalo de tiempo $\Delta t_{1,2}$ después del primer impulso, se produce el siguiente impulso τ_2 , después de lo cual el plasma está en una nueva posición Δl_2 lejos de la superficie del aislador. Con cada impulso sucesivo, el núcleo de plasma se mueve hacia la derecha y luego, al final del impulso, se permite que se recombine (figura 6, que muestra la posición del plasma después de dos impulsos), hasta que finalmente (figura 7) el plasma alcanza el extremo de los electrodos después de n impulsos de corriente, y se expulsa hacia la cámara de combustión. El número de impulsos de seguimiento, a , dependerá de la presión p en la cámara, de los parámetros del elemento de encendido (por ejemplo, la longitud de los electrodos, la distancia entre los electrodos y la forma de los electrodos) y de los parámetros de descarga de corriente (por ejemplo, valores pico de los impulsos, sus duraciones, los intervalos entre impulsos y el valor mínimo de corriente entre impulsos). Es posible que se requiera algo de experimentación para encontrar valores adecuados.

Aunque los impulsos de corriente se muestran como impulsos positivos en la figura 5, debe tenerse en cuenta que también pueden usarse impulsos negativos, o impulsos alternos o algún otro patrón de pluralidades. La fuerza de Lorentz F_L es proporcional al cuadrado de la corriente y , por tanto, es independiente de la polaridad de la corriente. Además, los impulsos de corriente de descarga, que se muestran rectangulares en la figura 5, podrían tener cualquier forma de onda adecuada, tal como forma triangular o forma sinusoidal.

Tal como se indicó anteriormente, con una presión de funcionamiento aumentada, también aumenta la ruptura de tensión a lo largo de la superficie del aislador. El aumento en la tensión de ruptura tiene un impacto negativo sobre la vida útil del aislador y de los electrodos. Tales efectos negativos pueden evitarse o reducirse significativamente limitando la corriente de ruptura. Por ejemplo, la introducción de una resistencia en el circuito de alta tensión, tal como se describe a continuación, limita la corriente de ruptura sin desperdiciar significativamente energía cuando la descarga de ruptura es de corta duración en comparación con el intervalo total de los impulsos de descarga de seguimiento. La limitación de la corriente hace que el modo de funcionamiento difiera sustancialmente del de los sistemas de TSI anteriores. En los sistemas de TSI anteriores, tales como los que se muestran en las patentes estadounidenses n.ºs 6.321.733 y 6.474.321, se deseaba que una corriente de ruptura alta fuera seguida inmediatamente por una corriente alta de los condensadores para crear la máxima aceleración y velocidad del plasma. El objetivo era conseguir que el plasma llegara al final de los electrodos y pasara a la cámara de combustión en un único impulso de descarga. En cambio, en un entorno de alta presión, el movimiento del plasma es pequeño después de la ruptura. Por tanto, es aceptable limitar la corriente de ruptura, ya que la corriente de ruptura sólo se usa para crear el plasma cerca de la superficie del aislador, en lugar de producir realmente un movimiento significativo del plasma.

El intervalo entre el final del impulso de corriente de ruptura y el primer impulso de corriente de seguimiento, $\Delta t_{b,1}$ depende del valor pico de la corriente de descarga. Suponiendo que se usa una resistencia R_b para lograr este efecto de limitación de corriente, entonces el tiempo de retardo depende del valor de esa resistencia, que depende de la tensión de ruptura aplicada que, a su vez, depende de la presión p . Por tanto, el valor de la resistencia R_b puede elegirse para minimizar la tensión sobre el aislador y el desgaste del electrodo.

La figura 8 muestra un diagrama de circuito esquemático parcial para un ejemplo de un circuito electrónico para producir el impulso de ruptura y los impulsos de seguimiento tal como se representa en la figura 5. En la figura 8, se muestra el conjunto de circuitos para generar sólo el impulso de ruptura y un impulso de seguimiento. Para cada

impulso de seguimiento adicional que se desee, puede replicarse el conjunto 110 de circuitos encerrado en una línea discontinua y todos esos circuitos pueden conectarse con los devanados secundarios de sus transformadores 102 elevadores en serie, de modo que cada uno de tales circuitos, a su vez, suministre uno de los impulsos secuenciados al elemento de encendido. (Obsérvese que también es posible una disposición en paralelo).

Una bobina 100 de encendido de alta energía genera una alta tensión, para proporcionar una descarga de ruptura, activado por una señal aplicada en 104 para provocar la conmutación del SCR 104A. La bobina 100 puede ser cualquier bobina de encendido adecuada tal como, pero sin limitarse a, la bobina modelo 8261 vendida por Autotronic Controls Corporation de El Paso, Texas, d/b/a MSD Ignition. Aunque en la industria habitualmente se denomina "bobina de encendido", el elemento 100 es en realidad un transformador. La bobina de encendido modelo 8261 mencionada anteriormente tiene un devanado primario de baja inductancia y proporciona una salida de 42-43 kV desde su bobina secundaria cuando la bobina primaria está energizada. La bobina secundaria del transformador 100 está conectada directamente (a través de la bobina 102B secundaria del transformador 102 elevador) a uno o más electrodos del elemento 101 de encendido, estando otro electrodo del mismo conectado a tierra.

La cadena 106 de diodos, cada uno en paralelo mediante una alta resistencia, limita la tensión de salida de la bobina 100 de encendido a una única polaridad y evita el zumbido.

Después del impulso de ruptura, se aplica una señal de activación en 105 para provocar que se genere un impulso de seguimiento. El transformador 102 elevador alimenta la línea de alta tensión (HVL) al elemento 101 de encendido con un impulso de corriente inducido por la descarga del condensador 103. El condensador 103 se carga a una tensión relativamente baja tal como, por ejemplo, aproximadamente 500 V y luego se descarga a través de la bobina 102A primaria del transformador 102 a tierra a través del SCR 105A.

Las señales de activación pueden generarse mediante cualquier circuito adecuado que pueda proporcionar parámetros fijos o programables.

El/los electrodo(s) de encendido conectado(s) a la línea de alta tensión también están conectados, a través de una cadena de diodos 107, y una red 111 RC, a una alimentación de baja tensión, tal como la alimentación de 500 V indicada. Los valores de resistencia en la red 111 se establecen para suministrar la corriente de retención, i_s .

Se apreciará que el circuito de encendido de la figura 8 representa sólo una manera de generar la tensión de ruptura y suministrar la corriente inicial y los impulsos de corriente de seguimiento que se desean. Puede emplearse cualquier otro mecanismo adecuado que genere impulsos comparables. Por ejemplo, podría usarse un circuito de corriente resonante que podría proporcionar impulsos de corriente oscilantes, tales como impulsos de corriente sinusoidales, en lugar de la pluralidad indicada de subcircuitos, cada uno de los cuales genera un único impulso. Además, mediante la inversión adecuada de las polaridades de la tensión y los diodos, el circuito de la figura 8 podría usarse para generar impulsos negativos en lugar de impulsos positivos.

Otro ejemplo de una arquitectura de circuito de encendido (en forma simplificada) se muestra en la figura 9 en 130. Sólo se muestran los componentes básicos del circuito, entendiéndose que una implementación práctica puede requerir otros componentes habituales. La fuente 132 de alimentación suministra una tensión (denominada "alta" tensión sólo para fines de distinguirla). La tensión es suficientemente alta para que pueda generar, cuando se intensifica por el transformador 134, una tensión de ruptura suficiente para crear un plasma en el elemento de encendido (no mostrado). La fuente de alimentación está conectada a un primer extremo del devanado 134A primario a través de un diodo 136, para cargar un condensador 138, conectado entre el otro extremo del devanado primario y tierra. Un generador 142 de impulsos suministra un tren o secuencia de impulsos. En un primer impulso, una señal de salida del generador 142 de impulsos cierra el conmutador 144 controlado electrónicamente. Esta acción conecta a tierra el ánodo del diodo 136, desconectando eficazmente la alimentación 132 para que no sufra un cortocircuito, y permite que el condensador 138 se descargue a través del devanado primario. El transformador 134 es un transformador elevador de núcleo saturable. La alimentación 132 de HV normalmente tiene una tensión de salida de algunos cientos de voltios. El cierre del conmutador 144 genera una gran oscilación de tensión a través del devanado primario del transformador. Normalmente, puede usarse una relación de vueltas de aproximadamente 1:35 - 1:40 en el transformador, y esto aumentará la oscilación de varios cientos de voltios en el devanado primario hasta el intervalo de decenas de miles de voltios en el devanado secundario, 134B. Esta última tensión es suficiente para producir una ruptura cuando se aplica a un elemento de encendido (conectado a un extremo del devanado secundario, pero no mostrado).

Preferiblemente, el impulso mencionado anteriormente también satura el núcleo del transformador 134.

Debido a la saturación del núcleo, si el generador 142 de impulsos suministra un siguiente impulso antes de que la saturación disminuya por completo, tal impulso no generará una tensión de salida de nivel de ruptura en la línea 152 de salida.

El otro extremo del devanado 134B primario, en 154, y un extremo de un condensador, 156, están conectados a

tierra mediante un diodo 158. El condensador 156 se carga mediante una alimentación de "baja tensión" (LV) a través de un diodo 164 protector. Cuando el conmutador 166 electrónico recibe un impulso del generador 142 de impulsos, el nodo 168 está conectado a tierra y el condensador 156 está conectado a tierra a través del diodo 172, la resistencia 174 y el conmutador 168 conectados en serie.

La alimentación 162 de baja tensión normalmente puede suministrar una tensión en el intervalo de 0 - 1000 voltios. El condensador 156 es una capacitancia grande en un sistema de encendido típico y la resistencia 174 puede dimensionarse para limitar la corriente de descarga (extraída a través del devanado 134 secundario del transformador) a aproximadamente 50 amperios (menos si una corriente más baja es suficiente en los impulsos de seguimiento).

Los diodos 182 y 184 simplemente protegen sus respectivos conmutadores de picos de polaridad inversa que podrían ser destructivos para ellos.

Las alimentaciones 132 y 162 se muestran separadas, pero en algunas aplicaciones puede usarse una sola alimentación. Además, los términos baja tensión y alta tensión no pretenden requerir que la salida de la alimentación 132 tenga una tensión más alta que la salida de la alimentación 162, aunque eso es lo más típico.

El diodo 164 se incluye por la misma razón que el diodo 136, para proteger su fuente de alimentación asociada de tener una salida en cortocircuito cuando el conmutador asociado está cerrado.

Dependiendo de la construcción exacta de las alimentaciones 132, 162, también puede ser deseable colocar una resistencia en serie entre una o ambas alimentaciones y el conmutador 144 ó 166 correspondiente, según sea aplicable, para limitar la corriente de salida de la alimentación y el tiempo de carga del condensador correspondiente.

Los conmutadores 144, 166 pueden implementarse usando diversos semiconductores, tales como SCR, IGBT (especialmente para el conmutador 144), MCT y otros elementos de conmutación de alta tensión que puedan existir ahora o en el futuro.

Un pequeño condensador, 159, puede puentear el diodo 158, proporcionando una trayectoria de baja impedancia a tierra para cambios rápidos de tensión y protegiendo el diodo 158 contra grandes picos inversos.

Son posibles otras variaciones. Por ejemplo, en lugar de que un único generador de impulsos accione los conmutadores 144 y 166, cada conmutador puede accionarse por un generador de impulsos diferente, o puede emplearse un generador de impulsos con diferentes salidas o señales de salida acondicionadas de manera diferente (posiblemente derivadas de una señal común) que accionan los conmutadores. O bien, puede usarse un conmutador, en lugar de dos conmutadores, tal como se muestra en la figura 10, en referencia al elemento 186 de conmutación (por ejemplo, MCT). (En la figura 10, se muestran expresamente las resistencias R aunque es posible que no sean necesarias, dependiendo de los detalles de la alimentación de energía). Si diferentes generadores de impulsos accionan cada uno de los conmutadores, pueden controlarse de manera independiente y esto permitirá adaptar una variedad de modos de funcionamiento.

En la figura 9, la resistencia 174 se muestra en un recuadro de línea discontinua, para indicar que es opcional. Independientemente del hecho de que la alimentación 162 pueda configurarse conjuntamente con el condensador 156 para controlar la amplitud deseada de los impulsos de corriente de seguimiento, toda la energía almacenada en el condensador 156 no puede transferirse al arco. Para mantener una corriente en los impulsos de seguimiento durante el intervalo de cada impulso, el condensador 156 debe descargarse a una velocidad controlada. Un modo de hacer esto es descargar el condensador a través de una resistencia, tal como la resistencia 174. Desgraciadamente, el uso de la resistencia 174 da como resultado la disipación de gran parte de la energía almacenada en forma de calor. De hecho, puede perderse más energía en forma de calor en la resistencia 156 de la que se gasta en el movimiento del plasma. Por tanto, este circuito adolece de un uso ineficiente de la energía.

Es posible mejorar la eficiencia del circuito y reducir la disipación de calor haciendo que el elemento 166 de conmutación sea una trayectoria de drenaje de corriente controlada. Entonces, en lugar de usar la resistencia 174 para limitar el drenaje de corriente del condensador 156, el transistor de conmutación (o elemento similar) se ocupa de esa necesidad, proporcionando una descarga controlada. Más específicamente, tal como se muestra en la figura 11, un elemento de conmutación activo (indicado en este caso como MOSFET 166') está conectado desde el nodo 168 a tierra a través de una resistencia 192. La tensión a través de esa resistencia se detecta como un indicador para medir la corriente real a través del transistor 166'. La lógica 194 de accionamiento de compuerta interpuesta entre el generador de impulsos y la compuerta del transistor 166', en respuesta a la tensión en la resistencia 192, hace funcionar el transistor como un regulador de conmutación, con un ciclo de trabajo variable y una disipación de potencia menor resultante que la que surge del uso de resistencia 174. La lógica de accionamiento 194 puede implementarse de varias maneras y puede incluir lógica fija o puede incluir lógica programable, incluyendo posiblemente un microcontrolador para hacer funcionar la lógica. Una ventaja de usar un microcontrolador es que la lógica puede configurarse para hacer funcionar el circuito para que actúe en los diversos modos comentados en el

presente documento, por ejemplo, con o sin corriente de retención.

5 Obsérvese que aunque la generación de impulsos de polaridad positiva resultará de los ejemplos ilustrados de circuitos de encendido, los expertos en la técnica de la electrónica podrán derivar fácilmente de ellos circuitos de encendido que producirán impulsos de polaridad negativa e incluso impulsos de polaridades variadas, en caso de que se desee tener los mismos. También puede ser deseable que algunos o todos los impulsos de activación tengan una polaridad diferente de los impulsos de salida.

10 El diseño detallado de la lógica de accionamiento y los parámetros para la tensión de ruptura, los impulsos de seguimiento, el elemento de encendido, etc. dependerán de las especificaciones del motor particular que se requiere que cumpla el sistema de encendido. Esos requisitos y consideraciones tales como el coste, la disponibilidad de los componentes, etc., también influirán en la selección de los componentes. La determinación de algunos de estos parámetros puede requerir cierto grado de experimentación en un modelo de motor(es) para el cual está destinado el sistema o circuito de encendido.

15 Aunque los problemas y su solución se han analizado usando sólo una forma de TSI, ambos se aplican igualmente a otros diseños de TSI, que usan electrodos paralelos y coaxiales.

20 Aunque en el presente documento se han analizado determinados métodos y aparatos para su uso con motores de combustión interna que funcionan a presiones altas y muy altas, se entenderá que esta tecnología también puede usarse con elementos de encendido de chispa móvil en motores de combustión interna que funcionan a presiones convencionales más bajas, o incluso con bujías convencionales. Sin embargo, las ventajas probablemente serán mayores con los elementos de encendido de chispa móvil.

25 Además, debe entenderse que aunque se ha presentado una teoría de funcionamiento, existen varios supuestos simplificadores que pueden limitar en gran medida la aplicación de esta teoría. No obstante, la invención, tal como se reivindica, produce un sistema de encendido que funciona en un entorno simulado de motor de alta presión, y se entenderá que cualquier simplificación o error en el análisis no resta valor a la invención.

30

REIVINDICACIONES

1. Método de generación de plasma, que comprende:
 - 5 a. aplicar a un elemento (101) de encendido que tiene al menos un par de electrodos (18, 20) una tensión de amplitud suficiente para hacer que se produzca una ruptura entre los electrodos (18, 20), dando como resultado una descarga eléctrica en el elemento (101) de encendido en una región de iniciación, y la formación de un núcleo de plasma adyacente a dicha región de iniciación;
 - 10 caracterizado por
 - b. hacer pasar toda la corriente de descarga desde el elemento (101) de encendido a través de un elemento (166, 166') de conmutación en una trayectoria de descarga del elemento (101) de encendido, en el que la trayectoria de descarga representa una trayectoria por medio de la cual la corriente de descarga a través de
 - 15 un plasma entre el par de electrodos está configurada para fluir; y
 - c. desconectar el elemento (166, 166') de conmutación mientras la corriente a través del mismo no sea cero.
- 20 2. Método según la reivindicación 1, que comprende además, después de la ruptura, aplicar a dichos electrodos (18, 20) al menos un impulso descargando un condensador (156) a través del elemento de conmutación en la trayectoria de descarga.
- 25 3. Método según la reivindicación 1, que comprende además, después de la ruptura, aplicar una pluralidad de impulsos a los electrodos (18, 20) haciendo pasar corriente desde el condensador (156) a través del elemento (166, 166') de conmutación en la trayectoria de descarga.
4. Método según la reivindicación 3 en el que uno o más de los impulsos son impulsos de tensión generados por el condensador (156) que extrae su corriente de descarga a través de un devanado (134B) secundario
- 30 de un transformador (134).
5. Método según la reivindicación 4, en el que el devanado (134B) secundario está en serie con el condensador (156) y uno de los electrodos (18, 20).
- 35 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que: el elemento de conmutación es un transistor conectado a tierra a través de una resistencia;
- se detecta una tensión a través de la resistencia como indicador para medir la corriente real a través del
- 40 transistor;
- se interpone una lógica de accionamiento de compuerta entre un generador de impulsos y la compuerta del transistor, sirviendo el generador de impulsos para conmutar el transistor a través de la lógica de accionamiento de compuerta; y
- 45 la lógica de accionamiento de compuerta responde a la tensión sobre la resistencia y hace funcionar el transistor como un regulador de conmutación.

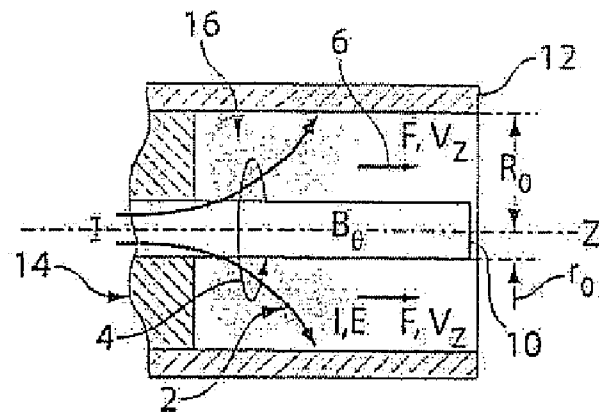


Fig. 1
(Técnica anterior)

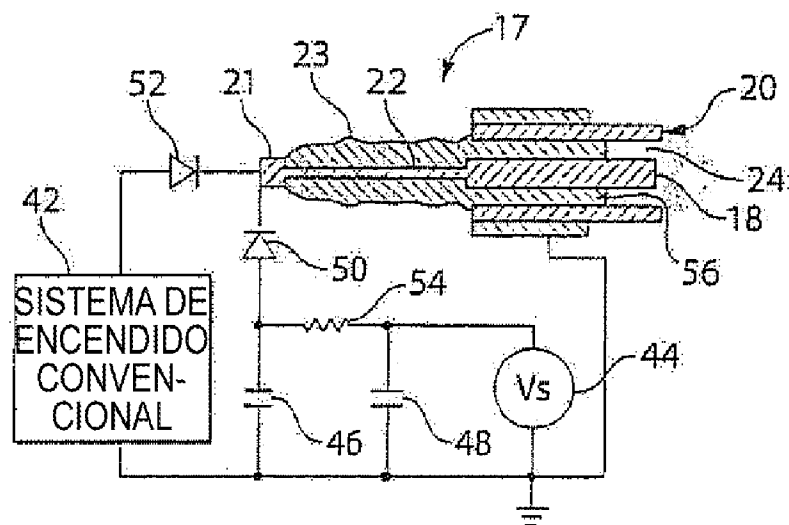


Fig. 2
(Técnica anterior)

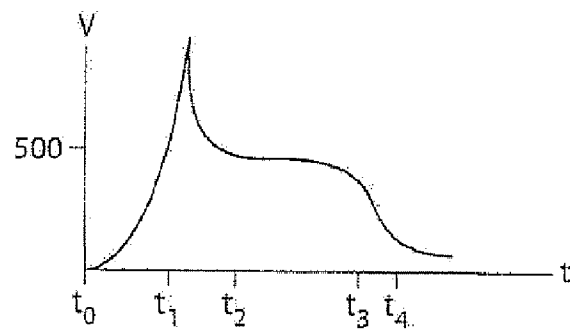


Fig. 3
(Técnica anterior)

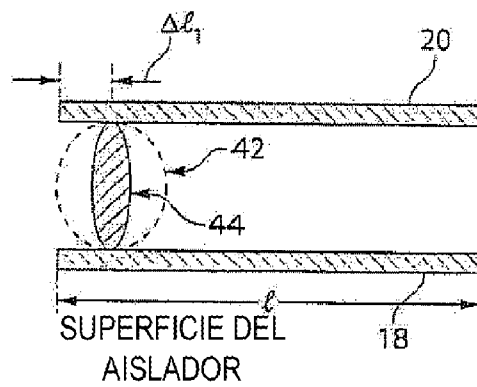


Fig. 4

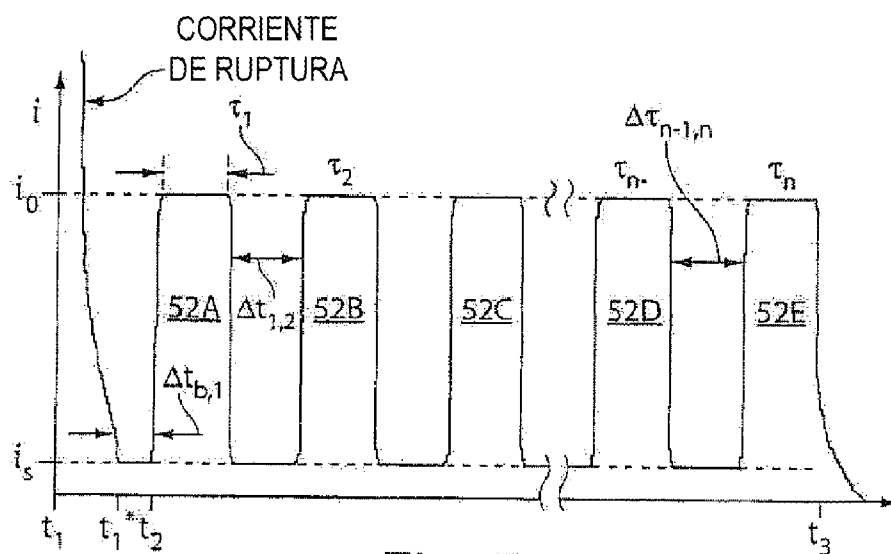


Fig. 5

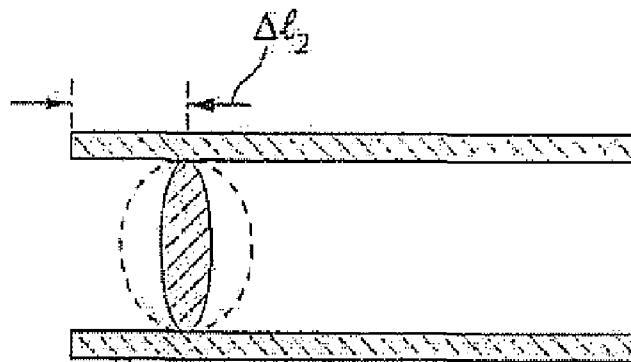


Fig. 6

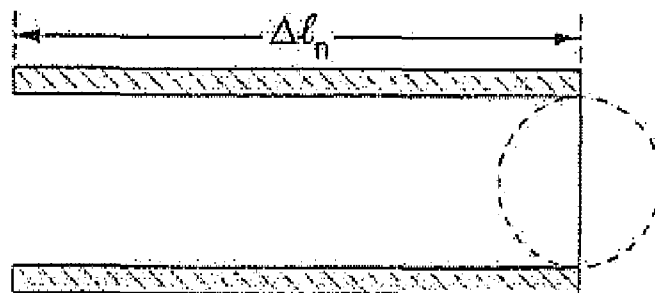


Fig. 7

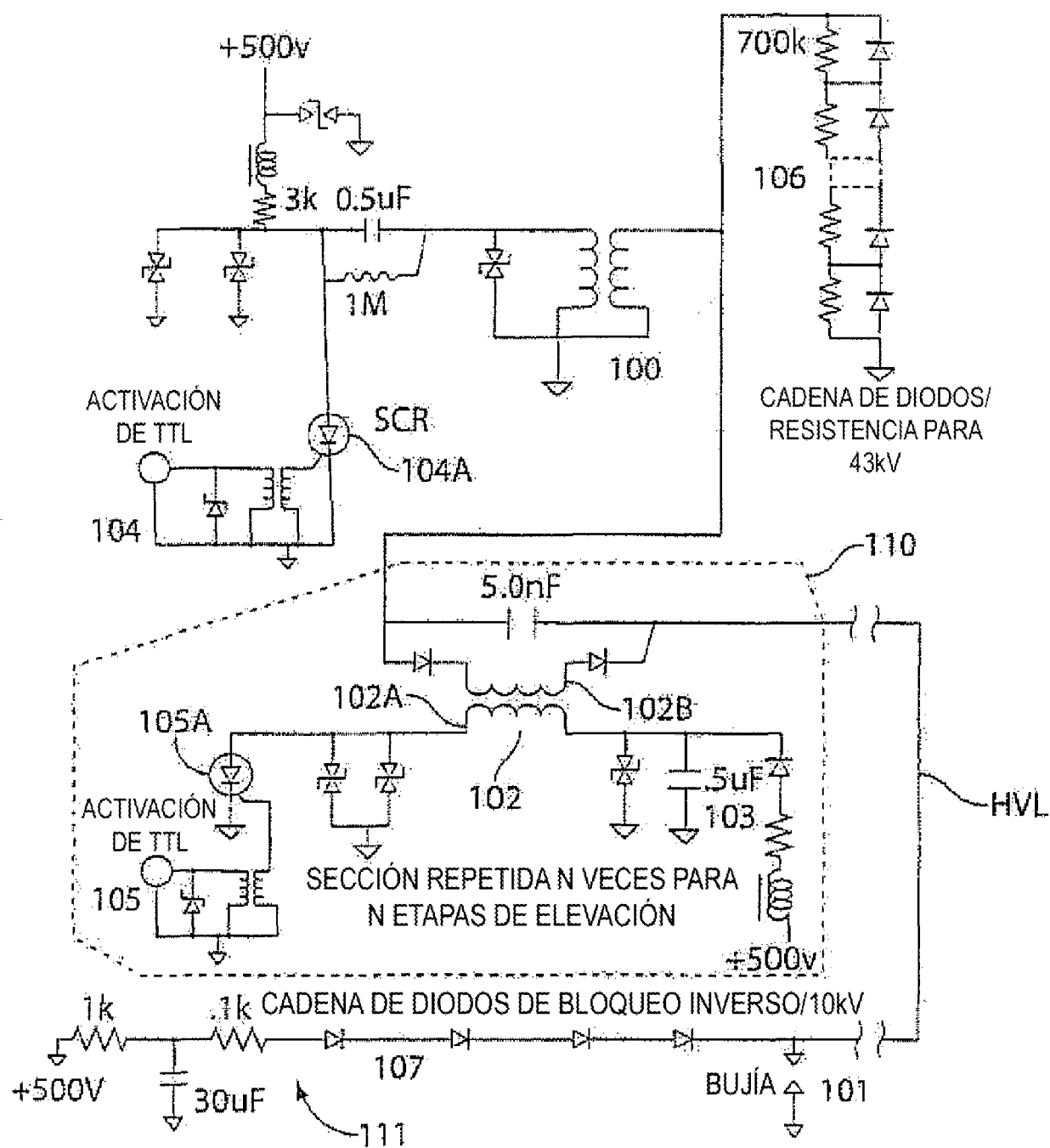


Fig. 8

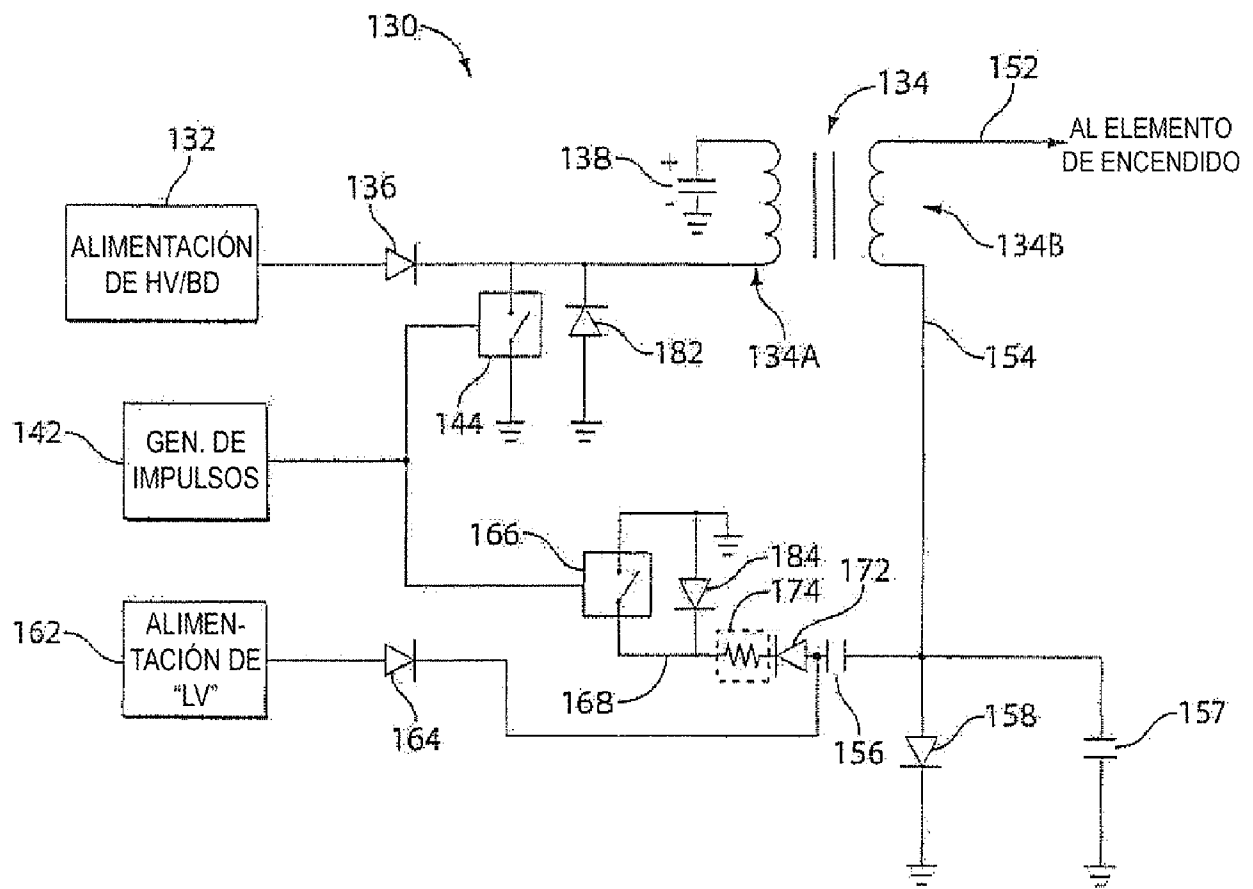


Fig. 9

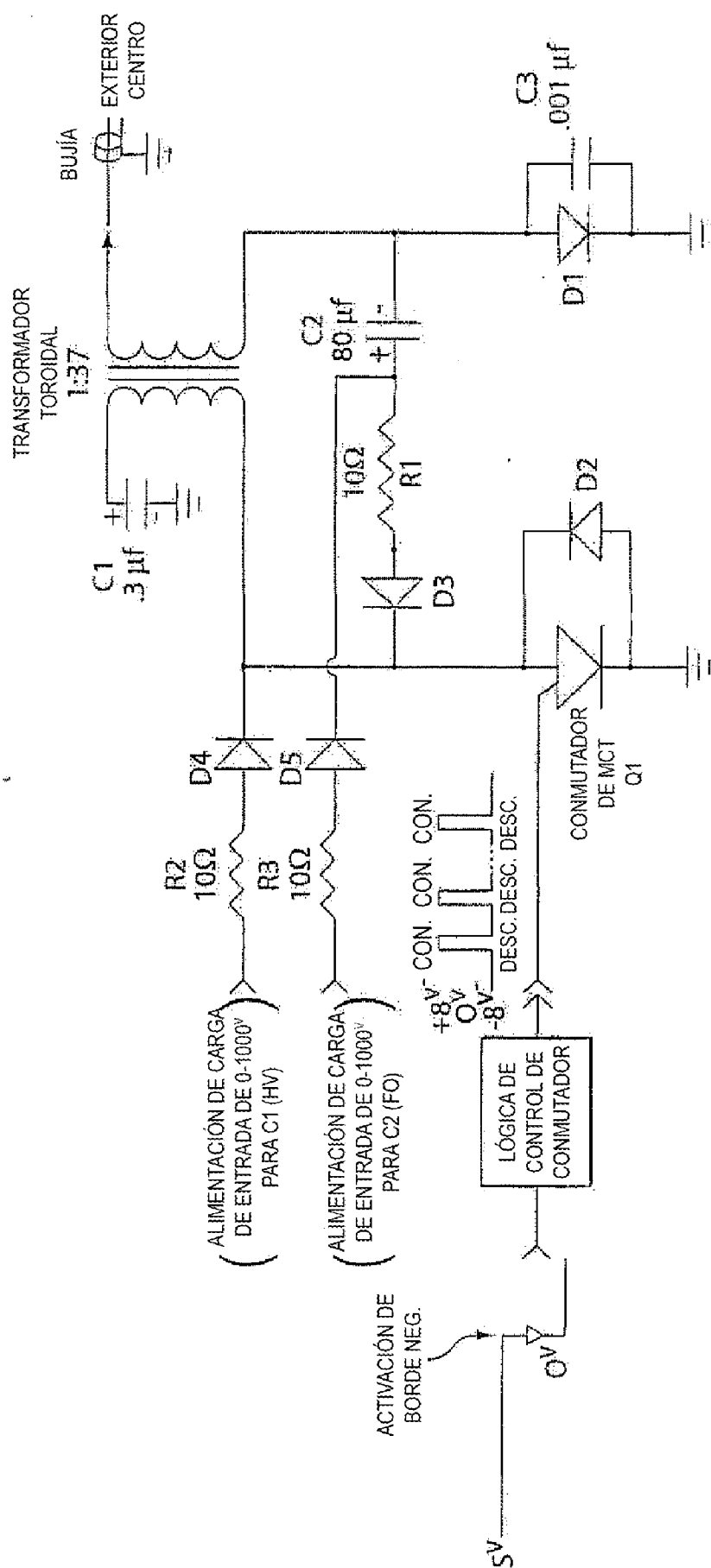


Fig. 10

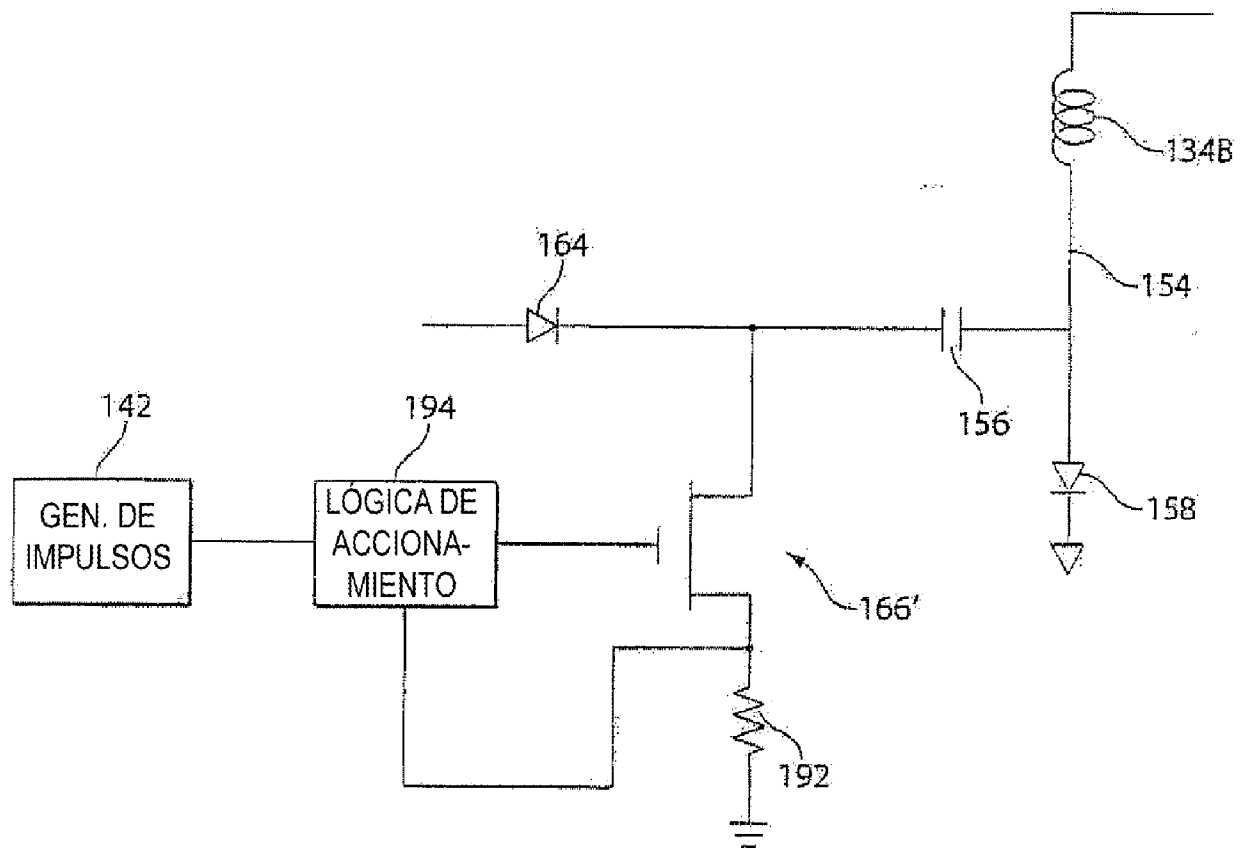


Fig. 11