

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 384 902**

51 Int. Cl.:

B23H 7/04 (2006.01)

B23H 1/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05016698 .2**

96 Fecha de presentación: **01.08.2005**

97 Número de publicación de la solicitud: **1749607**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **07.02.2007**

54 Título: **Procedimiento y generador para mecanizado por electroerosión**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
13.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
13.07.2012

73 Titular/es:
**AGIE CHARMILLES SA
VIA DEI PIOPPI 2
6616 LOSONE, CH**

72 Inventor/es:
**Bühler, Ernst;
Besson, Franck;
D'Amario, Rino;
Giandomenico, Nicola y
Knaak, Reto**

74 Agente/Representante:
Sugrañes Moliné, Pedro

ES 2 384 902 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

Procedimiento y generador para mecanizado por electroerosión

5 Campo de la invención

La invención se refiere a un procedimiento de generación de una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión según el preámbulo de las reivindicaciones independientes 1 y 2, y un generador para generar una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión según el preámbulo de las reivindicaciones 15 y 16.

Tales métodos y generadores se conocen por el documento US-A-4 710 603.

Antecedentes de la invención

15 En la Fig. 2 se muestra la configuración general de un tipo conocido de electroerosión por penetración (EDM). Una máquina de corte por hilo se diferencia de una máquina de electroerosión por penetración realmente sólo en los detalles, pero, no obstante, la mayoría de los fabricantes hacen uso de conceptos totalmente diferentes para los dos tipos de máquinas. Esto se aplica particularmente al generador de impulsos implicado, donde se necesitan impulsos de descarga muy cortos pero elevados para el corte por hilo, mientras que para la electroerosión por penetración se usan impulsos de descarga más largos de amplitud correspondientemente más bajos. Hasta la fecha, aún no existe una solución satisfactoria para un concepto global consistente.

25 La configuración de un sistema EDM implica generalmente los subsistemas: entrada de red de CA 1, armario eléctrico 2, sistema de cables 3 y máquina 4. El armario eléctrico 2 aloja un módulo de tensión de CA (CA), un módulo de tensión de CC (CC), un control numérico (CNC), uno o más módulos de accionamiento (Accionamiento), un módulo generador (Gen.), así como un módulo de control de máquina universal (Control). Como el contenido completo del armario eléctrico 2 es considerablemente voluminoso y pesado y la pérdida total de potencia es del orden de un solo dígito en kW, el armario eléctrico normalmente está situado a algo de distancia de la máquina 4.

30 El sistema de cables 3 es habitualmente de 2 m a 5 m de longitud. Un primer cable conecta los módulos de accionamiento (Accionamiento) a los motores de accionamiento de los ejes de la máquina 4 y suministra la corriente del motor, la corriente para cualquier freno que pueda estar provisto, así como las diversas señales digitales sensitivas de los transductores de posición. Estos cables son un factor de coste significativo y si no se diseñan con la debida atención pueden tener como resultado fácilmente un costoso tiempo de inactividad.

35 Un segundo cable conecta el módulo generador (Gen.) a la pieza de trabajo y al electrodo de la máquina 4. Este segundo cable tiene la desventaja de que las pérdidas de potencia, particularmente en el corte por hilo, debidas al elevado valor cuadrático medio RMS de la corriente de impulso, puede ser de hasta 100 W/m. Aparte de este desperdicio de energía no deseable, esto también puede tener como resultado que la estructura de la máquina se alabee debido al calor y, por lo tanto, a inexactitudes de la pieza de trabajo. Actualmente, la única solución a este problema es un complicado medio de refrigeración por agua.

45 Otra desventaja también está involucrada en la elevada rigidez de los cables usados, teniendo típicamente que involucrar ocho cables coaxiales en paralelo, cada uno de aproximadamente 5 mm² de sección de cobre. Como los cables están conectados a partes estructurales móviles de la máquina, su rigidez tiene como resultado la flexión de estas partes estructurales en el intervalo de micrómetros y de ese modo, por supuesto, a errores correspondientes en el mecanizado de la pieza de trabajo.

50 Un tercer cable sirve para conectar el módulo de control de máquina universal (Control) a un gran número de unidades de función en la máquina 4, como electroválvulas, bombas, mecanismos auxiliares, interruptores finales, sensores de temperatura, protecciones de seguridad, etc. Este tercer cable tiene como resultado, asimismo, costes considerables porque se necesita una gran cantidad de conductores diferentes, pero también porque cada variante de máquina necesita en última instancia un cable especial. Aparece una desventaja adicional cuando la máquina 4 y el armario eléctrico 2 se envían por separado al cliente, constituyendo un factor de riesgo añadido las muchas conexiones del sistema de cables 3 requeridas en la instalación.

55 En las Actas del 13^{vo} ISEM Vol. 1, Bilbao 2001, páginas 3 a 19, se explican todos los procedimientos y ecuaciones fundamentales para la generación de impulsos mediante condensadores de impulsos en cuanto a su aplicación en micro electroerosión EDM. Estos comentarios se aplican en general y, por lo tanto, también a la presente invención.

60 En las Actas del 13^{vo} ISEM Vol. 1, Bilbao 2001, páginas 153 a 160 se explica un generador no resistivo de tipo semipunto dual. Este generador está diseñado de manera que cada semipunto puede generar corrientes en triángulo simétricas. Cuando se controlan adecuadamente, la suma de las corrientes de los dos semipuntos es un impulso trapezoidal de ondulación cero. Mediante modulación por anchura de impulsos con una señal que

representa la forma de la corriente dentro del intervalo de los tiempos de subida y descenso de las corrientes en triángulo puede sintetizarse una gran variedad de formas de corriente deseadas. Como sólo están provistos semipuentes, correspondientemente la forma del impulso en la salida sólo puede ser unipolar. Aunque eliminar las resistencias de carga mejora la eficiencia, esta se reduce casi instantáneamente debido a las conmutaciones durante los picos de corriente. Esta desventaja se vuelve más grave cuanto más elevada se selecciona la corriente de impulso y la frecuencia. Cuando se usa tal generador para generar impulsos pronunciados, como es habitual, se requieren necesariamente frecuencias elevadas. Un problema adicional radica en una desventaja del propio circuito puente, concretamente en la existencia de elementos conmutadores entre la pieza de trabajo y el suministro de energía, siendo entre estos puntos que los flancos de conmutación pronunciados tienen como resultado elevadas corrientes desplazamiento en el lado de la red de CA, teniendo como resultado en última instancia una escasa compatibilidad electromagnética. Por la misma razón, las dos fuentes tienen que ser de corriente continua desacoplada una de otra, lo cual aumenta innecesariamente los costes de la configuración.

El documento US 4.710.603 desvela un generador, que funciona según el principio de descarga de condensador de impulsos, cuyo circuito básico se muestra en la FIG. 3. Desde una fuente de tensión de CC E un condensador C1 es cargado a través de un elemento conmutador Q1 y una inductancia L3. Un elemento conmutador adicional Q2 descarga el condensador de impulsos C1 a través de una inductancia adicional L2 dentro de la separación entre electrodos PW. Este circuito no requiere ni resistencias de carga ni elementos conmutadores en funcionamiento lineal.

El documento US 4.766.281 desvela un generador con un regulador de tensión de carga pasivo tal como se muestra en la FIG. 4. El regulador de tensión de carga comprende un transformador convertidor de líneas y dos diodos. La eficiencia de este generador es elevada ya que se eliminan las pérdidas por conmutación tal como ocurre con el generador tal como se interpreta del documento US 4.710.603 a través del elemento conmutador Q1.

Sin embargo, ambos generadores aún tienen desventajas. En primer lugar, la frecuencia de impulsos está limitada a valores modestos de aproximadamente 70 kHz debido a la carga unipolar. Aumentar más la frecuencia permitiría que la corriente de carga aumentara hasta valores que afectan negativamente a la eficiencia. En segundo lugar, los generadores aún son demasiado grandes para permitir su ubicación, por ejemplo, en las inmediaciones directas del electrodo. Para una explicación más detallada de esto, se hace referencia a la FIG. 5 que traza para estos generadores las curvas de la tensión del condensador U_c y la corriente de impulso I_{gap} en la separación entre electrodos como una función del tiempo t . Resulta evidente que para una corriente de impulso sinusoidal I_{gp} la tensión de carga negativa U_{chrg} se voltea de manera cosinusoidal a una tensión de carga residual positiva U_{end} . Esta tensión de carga residual U_{end} corresponde exactamente a la energía que no es convertida en la separación entre electrodos y reflejada de vuelta al condensador de impulsos. Ignorando las pérdidas en la línea la tensión de carga residual tal como se interpreta de las Actas del 13^{vo} ISEM Vol. 1, Bilbao 2001, páginas 3 a 19, es:

$$U_{end} = -U_{chrg} + 2*U_{gap} \quad (1)$$

donde U_{gap} corresponde a la tensión a través de la separación entre electrodos. La tensión residual U_{end} no es, por consiguiente, una función ni de la corriente de impulso ni de la capacitancia del condensador de impulsos, ni de la inductancia del circuito de descarga. Después de una descarga el regulador de tensión de carga comienza inmediatamente a recargar de nuevo el condensador de impulsos a la tensión de carga negativa deseada U_{chrg} . En esta disposición, la energía eléctrica completa de la tensión de carga residual U_{end} se convierte dentro de una inductancia (por ejemplo, dentro de la bobina L3 en la FIG. 3 o dentro del transformador convertidor de líneas en la FIG. 4) en primer lugar en energía magnética, antes de ser almacenada luego de nuevo en forma de energía eléctrica en el condensador de impulsos en polaridad inversa.

El documento US 6.525.287 B2 desvela un nuevo generador que incluye una pluralidad de condensadores para generación de impulsos. Los condensadores están insertados en la rama transversal de un puente completo en funcionamiento de CA. La idea principal de esta invención es sustituir las resistencias de carga por la impedancia de CA sin pérdidas de los condensadores. Aquí, sin embargo, los elementos conmutadores del puente completo tienen que conmutar prácticamente la corriente de carga total con pérdidas elevadas, si no, la ondulación en la corriente sería el 100% y una considerable cantidad de energía se almacena inductivamente en el sistema de cables. Para manejar con seguridad tales cantidades de energía se necesitan circuitos de seguridad disipativos adicionales.

El documento US 5.380.975 desvela un generador que incluye una pluralidad de condensadores de impulsos que son descargados simultáneamente por elementos conmutadores dentro de la separación entre electrodos. Esto tiene como resultado un aumento de la capacitancia comparada con la de un único condensador de impulsos y la energía de descarga puede mantenerse en un nivel prescrito.

Las patentes de EE.UU. 4.072.842 y 6.281.463 muestran generadores en los que las fuentes de tensión de encendido están conectadas mediante diodos a un generador de tipo de modo de conmutación para hacer disponible una tensión de encendido elevada selectiva en la separación entre electrodos en tanto que conservando

una frecuencia de conmutación minimizada del regulador de corriente de impulso. Todas las fuentes de encendido de estos generadores comprenden resistencias de carga y son incapaces, por ejemplo, de regular la corriente de impulso o influir de otro modo en su forma. Aunque los generadores de esta clase eran un avance siempre que la fuente de tensión de encendido se usara sólo para generar una tensión (es decir, esencialmente sin corriente), al intentar usar también la fuente de tensión de encendido para generar las corrientes de descarga más pequeñas (problemáticas para los reguladores de CC debido a que la frecuencia de conmutación es demasiado elevada), sin embargo, el principio produjo una caída de eficiencia no deseada.

El objeto de la invención es proporcionar un procedimiento y un generador para generar impulsos de descarga que tengan una frecuencia de descarga más elevada.

Resumen de la invención

La invención logra el objeto anteriormente mencionado con el tema de las reivindicaciones independientes 1, 2, 15 y 16. Las realizaciones preferidas se desvelan en las reivindicaciones dependientes.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán realizaciones de la invención, a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La FIG. 1 es un diagrama esquemático de una máquina de electroerosión por penetración de una realización de la invención.

La FIG. 2 es un diagrama esquemático de una máquina de electroerosión por penetración de una técnica anterior.

La FIG. 3 es un diagrama de circuito de un generador de tipo de descarga de condensador de impulsos de la técnica anterior.

La FIG. 4 es un diagrama de circuito de otro generador de tipo de descarga de condensador de impulsos de la técnica anterior.

La FIG. 5 son diagramas de formas de onda de la tensión de carga y la corriente de descarga en el generador de tipo de descarga de condensador de impulsos de la técnica anterior.

La FIG. 6 son diagramas de formas de onda de la tensión de carga y la corriente de descarga en el generador de tipo de descarga de condensador de impulsos de una realización de la invención.

La FIG. 7 es un diagrama de circuito de una fuente de corriente bipolar de una realización de la invención.

La FIG. 8 es un diagrama de circuito de un circuito de carga/descarga de una realización de la invención,

La FIG. 9 es un diagrama de circuito de un circuito inversor que incluye un transformador de aislamiento de una realización de la invención.

La FIG. 10 es un diagrama de circuito de un módulo generador que incluye una pluralidad de circuitos de carga/descarga y una pluralidad de circuitos inversores de una realización de la invención.

La FIG. 11 es un diagrama de circuito de un sensor que detecta indirectamente la corriente de descarga.

La FIG. 12 es un diagrama de circuito de un sensor para detectar la tensión de carga.

La FIG. 13 es un diagrama de circuito de un circuito de carga/descarga para generar una tensión de encendido según una primera realización.

La FIG. 14 es un diagrama de circuito de un circuito inversor para generar una tensión de encendido según una primera realización.

La FIG. 15 es un diagrama de circuito de un circuito de carga/descarga para generar una tensión de encendido y pequeñas corrientes de descarga según una segunda realización.

La FIG. 16 es un diagrama de circuito de un circuito inversor para generar una tensión de encendido y pequeñas corrientes de descarga según una segunda realización.

La FIG. 17 es un diagrama de circuito de un medio de carga/descarga para generar una tensión de encendido y pequeñas corrientes de descarga según una tercera realización.

5 La FIG. 18 es un diagrama de circuito de un circuito inversor para generar una tensión de encendido y pequeñas corrientes de descarga según una tercera realización.

Las FIGs. 19a-d muestran la composición de un impulso sinusoidal a partir de tres impulsos parciales.

10 Las FIGs. 20a-c muestran la composición de un impulso que tiene flancos pronunciados a partir de dos impulsos parciales.

Las FIGs. 21a-d muestran la composición de un impulso que tiene flancos pronunciados y una gran amplitud a partir de cuatro impulsos parciales.

15 Las FIGs. 22a-d muestran la composición de un impulso cuasi-rectangular a partir de tres impulsos parciales.

Las FIGs. 23a-d muestran la composición de un impulso de baja ondulación cuasi-rectangular para electroerosión por penetración a partir de seis impulsos parciales.

20 Las FIGs. 24a-e muestran la composición de un impulso de alta ondulación cuasi-rectangular para electroerosión por penetración a partir de ocho impulsos parciales.

25 Las FIGs. 25a-e muestran la composición de un impulso de conexión lenta/desconexión rápida de baja ondulación para electroerosión por penetración a partir de cuatro impulsos parciales.

Las FIGs. 26a-e muestran la composición de un impulso de sobretensión de desconexión de baja ondulación para electroerosión por penetración a partir de siete impulsos parciales.

30 Las FIGs. 27a-e muestran la composición de un impulso de subimpulso de desconexión de baja ondulación para electroerosión por penetración a partir de siete impulsos parciales.

Las FIGs. 28a-e muestran la composición de un impulso de desconexión rápida inclinado para electroerosión por penetración a partir de cuatro impulsos parciales.

35 Descripción de las realizaciones preferidas

40 La FIG. 1 ilustra los módulos principales de una máquina de electroerosión por penetración que en esta disposición también puede estar subdividida en módulos conocidos, una entrada de red de CA 1 con el módulo de CA subsiguiente y un módulo de CC. El armario eléctrico 2, sin embargo, ahora es considerablemente menor y puede estar alojado en una consola de operador ya que los módulos de accionamiento (Accionamiento), el módulo generador (Gen.) y el módulo de control de máquina universal (Control) ahora están todos reubicados en la máquina 4.

45 El sistema de cables 3 de la Fig. 2 ha sido eliminado, habiendo sido sustituido por enlaces de datos estandarizados 6 (ENLACE) que se reúnen en una configuración de estrella en un nodo 5. En el nodo 5 también se dispone de toda la información y las órdenes procedentes de, y dirigidos hacia los diversos módulos a efectos de diagnóstico. El nodo 5 está instalado en una ubicación fácilmente accesible, pero preferentemente en la máquina 4.

50 El suministro de energía de los diversos módulos puede hacerse directamente a través del enlace de datos 6 hasta un vataje de aproximadamente 50 W, estando provisto asimismo el cable de tensión de CC estandarizado 7 para requisitos de potencia superiores, que conduce en forma de estrella desde el módulo de tensión de CC (CC) hasta los módulos que requieren valores de potencia superiores. Un cable de tensión de CC 7 que tiene una sección de sólo 1,5 mm² y una tensión de CC de, por ejemplo, +/- 280 V puede suministrar un vataje de hasta 5,6 kW sin problemas, convirtiéndose en calor sólo 2,3 W/m. Los generadores para corte por hilo modernos requieren típicamente 2,2 kW de vataje medio de electroerosión para cortar acero a 500 mm²/min, siendo transformados como calor unos buenos 37 W/m por el sistema de cables 3 cuando comprende ocho cables coaxiales en paralelo de 5 mm² cada uno. Bajo estas condiciones, un cable de tensión de CC 7 transformaría en calor sólo unos despreciables 0,37 W/m, es decir, 100 veces menos.

60 Extrapolar los valores de corriente a 5,6 kW de potencia media de electroerosión daría una velocidad de eliminación de material de 1250 mm²/min en acero, y generaría una considerable pérdida de potencia de 94 W/m respecto al sistema de cable 3 conocido. Una alternativa viene dada reubicando además la entrada de red de CA 1, el módulo de CA (CA) y el módulo de CC (CC) en la máquina 4. En esta disposición la consola del operador (armario eléctrico 2) aloja sólo el control numérico (CNC) y puede conectarse a través de un único enlace de datos estandarizado 6

(ENLACE) y suministrársele la energía eléctrica necesaria. Los cables de tensión de CC estandarizados 7 (CC) también son así más cortos, y simplemente existen internamente dentro de la máquina 4.

5 Esto simplifica enormemente la instalación de tal sistema en la ubicación del cliente, requiriendo simplemente conectar la entrada de red de CA 1 a la red de CA y, cuando sea necesario, enchufar el enlace de datos 6 (ENLACE) dentro de una consola de operador.

10 La FIG. 6 ilustra la variación en el tiempo de la tensión del condensador U_c y la corriente de impulso I_{gap} (también denominadas en este documento como las formas de onda de la tensión y la corriente) para un generador tal como se describe en lo siguiente en comparación con las formas de onda para un generador conocido, tal como se muestra en la FIG. 5. Para una corriente de carga comparable el tiempo de carga t_{chrg} de la FIG. 6 es varios factores más corto que el trazado en la FIG. 5, y la tensión de carga residual U_{end} es complementada simplemente por un corto impulso de corriente de polaridad correcta hasta la tensión de carga deseada U_{chrg} . La tensión de carga residual U_{end} no experimenta transformación por energía magnética, siendo esta la razón por la que se conserva con cerca del 100% de eficiencia, permitiendo que se aumente significativamente la frecuencia máxima de los impulsos de descarga.

15 La FIG. 7 ilustra un regulador de carga en forma de una fuente de corriente bipolar 8-17 de una realización de la invención. Las entradas V_{dc+} , V_{dc-} y el neutro 0 V son alimentadas con una tensión de CC de, por ejemplo, +/- 280 V desde un módulo de tensión de CC (CC en la FIG. 1) a través de un cable de tensión de CC estandarizado 7. El neutro 0 V corresponde aproximadamente al potencial de tierra con carga simétrica, lo cual es ventajoso para una elevada CEM del sistema.

20 En el caso más sencillo la tensión de CC se obtiene directamente del módulo de CC (CC) a través de un puente rectificador trifásico y condensadores de filtro desde la red de CA de 400 V popular y no requiere aislamiento de línea como tal. Como alternativa, puede estar provisto un puente inversor activo trifásico que comprende elementos conmutadores electrónicos y diodos. Esta alternativa permite conseguir una abundancia de funciones adicionales como el control de CC de bucle cerrado para compensar las fluctuaciones de la red de CA, aumentando la tensión de CC por encima de la red de CA pico, una función de arranque suave, corrección del factor de potencia (CFP), estabilización del neutro de 0 V en carga de CC asimétrica, y retorno de energía de CC a la red de CA de 400 V. Todos estos circuitos resultan conocidos para alguien experto en la materia y no requieren más comentarios en este documento.

25 Los condensadores 8 y 9 proporcionan los impulsos de corriente para la fuente de corriente bipolar 8-17, estando provistos para mantener el cable de tensión de CC 7 (CC) libre de corrientes pulsantes. Una fuente de corriente positiva sirve para generar una corriente de carga positiva I_+ . Los elementos conmutadores 10 y 16 se conectan simultáneamente, teniendo como resultado una corriente creciente lineal, que parte de la entrada V_{dc+} a través de la inductancia 14 de vuelta al terminal de 0 V. Después de un cierto tiempo, y no antes de que la salida I_+ haya sido conmutada al condensador de impulsos 22 para cargar (FIG. 8) el elemento conmutador 16 y, cuando sea necesario, el elemento conmutador 10 se desconectan. A partir de este momento la corriente de carga I_+ circula por el condensador de impulsos 22 en la complementación de su tensión de carga. Un sensor (SENS en la FIG. 8) compara la tensión de carga con un valor establecido y envía una señal de datos al controlador (FPGA en la FIG. 10) en cuanto la tensión de carga ha alcanzado el valor establecido. Luego se conecta el elemento conmutador 16, teniendo como resultado un colapso súbito de la corriente de carga I_+ en el condensador de impulsos. Si el elemento conmutador 10 aún estaba conectado en este momento, se desconecta asimismo y la corriente residual restante I_+ se hace circular entonces por el diodo 12, la inductancia 14 y el elemento conmutador 16. Para proporcionar una corriente de impulso de carga subsiguiente de la misma polaridad, el elemento conmutador 10 se conecta de nuevo en el momento adecuado y se repite el procedimiento tal como se describió anteriormente.

30 Como la inductancia 14 actúa como fuente de corriente, la tensión de carga en el condensador de impulsos 22 puede ser considerablemente más elevada que la tensión en la salida V_{dc+} . Sin embargo, esto podría tener consecuencias perjudiciales para el elemento conmutador 16 si este concretamente fuera a ser abierto bajo tensión debido a un malfuncionamiento antes de que la salida de corriente de carga I_+ sea conectada al condensador de impulsos 22. Por esto es por lo que están provistos diodos de protección contra transitorios (no mostrados) en paralelo con los elementos conmutadores 16 y 17 o además pueden insertarse los diodos de recuperación 45 y 46 entre los terminales I_+ y V_{dc+} e I_- y V_{dc-} respectivamente para restringir la tensión de carga a las tensiones de entrada V_{dc+} y V_{dc-} . Si es necesario, pueden aumentarse las tensiones de entrada V_{dc+} y V_{dc-} . Para generar impulsos de descarga de gran amplitud y poca duración, se prefiere trabajar con una tensión de carga tan elevada como sea posible conjuntamente con una capacitancia mínima del condensador de impulsos 22.

35 La configuración especular invertida que está constituida por los elementos conmutadores 11 y 17, los diodos 13 y la inductancia 15 sirve para generar la corriente de carga negativa I_- y funciona de manera análoga a la fuente de corriente positiva tal como se describió anteriormente.

La fuente de corriente bipolar 8-17 tal como se muestra en la FIG. 7 puede hacerse funcionar de manera muy diversa. Al intentar minimizar las pérdidas en tanto que maximizando la frecuencia de funcionamiento pueden necesitarse diferentes procedimientos dependiendo en parte de la aplicación particular en cuestión.

5 Así, para una buena eficiencia se prefiere impedir la circulación de corrientes innecesariamente elevadas en las inductancias 14, 15 y los diodos 12, 13 durante un periodo de tiempo prolongado. Una alternativa que prevenga esto es útil cuando se emplean los diodos de recuperación adicionales 45, 46, desconectando los elementos conmutadores 10 y 16 u 11 y 17 al terminar de haber cargado el condensador de impulsos 22. La energía magnética residual almacenada en las inductancias 14 ó 15 es recuperada luego mediante los diodos 12 y 45 ó 13 y 46 dentro de los condensadores 8 y 9. Este modo de funcionamiento es ventajoso cuando existe una pausa mínima entre dos impulsos de carga, si no, es más ventajoso hacer uso de la energía residual directamente para el siguiente impulso de carga.

10 Aparece otra alternativa para sincronizar la desconexión de los elementos conmutadores 16, 17 al comienzo de la carga del condensador. Concretamente, seleccionar este momento ya durante el impulso de descarga, preferentemente cuando el cruce del condensador de impulsos 22 es justo una tensión de 0 V, logra una conmutación absolutamente sin pérdidas. Como efecto secundario positivo, el tiempo de carga también se acorta mediante esta disposición. Es más, en una situación extrema, el condensador de impulsos 22 puede haber vuelto ya a alcanzar el valor establecido de la tensión de carga al final de su descarga, estando así disponible directamente para una descarga posterior.

15 Para maximizar la frecuencia de funcionamiento se minimizan los valores para las inductancias 14, 15 y la acción de carga de estas inductancias 14, 15 se inicia directamente al comienzo de la descarga del condensador de impulsos 22. Para tensiones de carga superiores además es ventajoso dejar los elementos conmutadores 10, 11 conectados también durante la carga del condensador, acortándose además la acción de carga debido a la energía adicional procedente de los condensadores 8, 9.

20 El circuito de carga/descarga 18-26 tal como se muestra en la FIG. 8 para el condensador de impulsos 22 está conectado a través de entradas correspondientes I+, I- a la fuente de corriente bipolar 8-17 tal como se muestra en la FIG. 7. El segundo terminal está conectado a la entrada de 0 V que, a su vez, está conectada al neutro de 0 V de la fuente de corriente bipolar 8-17. Los elementos conmutadores 18, 19 junto con los diodos 20, 21 son responsables de aplicar la polaridad deseada durante la carga. En el condensador de impulsos 22 un sensor (SENS) detecta continuamente la condición de carga y a partir de ella obtiene diversas señales de datos. Los elementos conmutadores 24 y 26 con los diodos 23 y 25 sirven para descargar el condensador de impulsos 22 con la polaridad correcta a la salida T_{pr}.

25 En algunas realizaciones están provistos preferentemente diodos adicionales 63 y 64 para aplicaciones específicas. En una aplicación de corte por hilo, puede surgir la situación en la que una descarga ya encendida se apaga inmediatamente debido a una escasa resistencia de transición del contacto del hilo o a una ionización demasiado débil de la separación entre electrodos. Si se prosiguió la descarga del condensador de impulsos 22 su elevada tensión de carga conduciría a un re-encendido forzado en la separación entre electrodos que, a su vez, tendría como resultado inmediatamente grietas en el hilo. Para prevenir tales daños los elementos conmutadores 24 ó 26 son desconectados a la fuerza y surge la cuestión de qué hacer con la energía almacenada en las diversas inductancias del circuito de descarga. Los procedimientos conocidos para generadores de tipo de descarga de condensador proporcionan diodos de protección contra transitorios en paralelo a los elementos conmutadores y transforman negativamente la energía en calor. Las numerosas apariciones de tales descargas perjudiciales disminuyen la eficiencia e incluso pueden destruir los diodos de protección contra transitorios, teniendo como resultado una avería total del generador. En una realización preferida la energía es recuperada ventajosamente a través de los diodos 63, 64 y los terminales V_{dc+}, V_{dc-} dentro de los condensadores 8, 9. Como todo el proceso es iniciado por la unidad de control central (FPGA en la FIG. 10), se cuenta el número de estas interrupciones de impulsos prematuras por unidad de tiempo y se usa o se envía como valor de control de proceso, información de diagnóstico o alerta temprana.

30 La entrada primaria T_{pr} de un transformador de aislamiento 27 del circuito inversor 28-32 tal como se muestra en la FIG. 9 está conectada a la salida T_{pr} correspondiente del circuito de carga/descarga 18-26 tal como se muestra en la FIG. 8. La segunda entrada primaria de 0 V del transformador de aislamiento 27 está conectada al neutro de 0 V correspondiente tal como se muestra en la FIG. 7. El transformador de aislamiento 27 comprende dos devanados secundarios conectados en serie para hacer que siempre esté disponible la polaridad de impulsos positiva y negativa. El neutro de estos devanados secundarios está conectado a la salida WS que, a su vez, está conectada a la pieza de trabajo. Configurar el circuito generador estrictamente simétrico alrededor del neutro de 0 V es ventajoso por compatibilidad electromagnética. Como la pieza de trabajo normalmente está a potencial de tierra, no aparecen, o sólo de manera insignificante, corrientes de desplazamiento capacitivas a través del circuito hacia la conexión 1 de la red de CA. La ventaja es una reducción de costes, pérdidas y espacio ocupado para grandes elementos de supresión magnética. Los otros dos terminales de estos devanados secundarios del transformador de aislamiento 27

están conectados a la salida EL a través de los elementos conmutadores 29, 30, 34 y 36 así como sus diodos asignados 28, 31, 33 y 35 y a través de una inductancia 32. La salida EL está conectada a su vez al electrodo. Los elementos conmutadores 30 y 36 en esta disposición se conectan para impulsos de descarga positivos, mientras que los elementos conmutadores 34 y 29 se usan correspondientemente para los impulsos de descarga negativos. Esto permite que cualquier polaridad momentánea de la tensión de carga del condensador de impulsos 22 sea convertida en una polaridad arbitraria para el impulso de descarga dentro de la separación entre electrodos.

Sin embargo, el circuito inversor también puede simplificarse cuando, por ejemplo, para una máquina de electroerosión por penetración, sólo se necesitan impulsos de descarga positivos procedentes del módulo generador eliminando los elementos conmutadores 29, 34 y sus diodos 31, 35. Se aplica lo mismo para una máquina de corte por hilo de la que pueden eliminarse los elementos conmutadores 30, 36 y sus diodos 28, 33 cuando sólo se requieran impulsos negativos. Lo mismo es válido para todos los circuitos adicionales que han de describirse en relación con las FIGs. 13-18.

El transformador de aislamiento 27 ofrece asimismo múltiples grados de libertad de dimensionamiento. Ventajosamente, uno asegura una capacidad adecuada de resistencia a sobretensión transitoria para aislar la red de CA de acuerdo con los requisitos estándar. Además, uno idealiza el acoplamiento entre el lado primario y el lado secundario y mantiene la inductancia principal suficientemente elevada de manera que no se produzcan corrientes de magnetización excesivamente elevadas. Ambas medidas previenen ventajosamente las pérdidas de la corriente de impulso.

Para un acoplamiento óptimo es ideal una relación de transformación de 1:1, aunque la desviación de este requisito puede ser ventajosa para la eficiencia global para hacer funcionar, por ejemplo, el circuito de carga/descarga 18-26 tal como se muestra en la FIG. 8 con menos corriente y correspondientemente más tensión según sea completamente correcto ya que se dispone de componentes correspondientes que tienen una elevada capacidad de resistencia a sobretensión transitoria y, tal como se explica más adelante, no hay que ocuparse de pérdidas por conmutación. Reducir la corriente disminuye las pérdidas en polarización directa de todos los elementos conmutadores y diodos aumentando así la eficiencia global.

Los citados requisitos sobre el transformador de aislamiento 27 son satisfechos preferentemente con transformadores planos que tienen núcleos planos y devanados planos. Tales transformadores especialmente en lo que se refiere al rendimiento de aislamiento estándar se desvelan en el documento US 5.010.314 y son construidos por la empresa de PAYTON PLANAR MAGNETICS Ltd. Boca Raton, South Florida, EE.UU. Como el área de tensión/tiempo de los impulsos que son transmitidos es muy pequeña, estos transformadores son tan pequeños y ligeros que pueden ser integrados sin problema en el circuito impreso de un módulo generador. Esta tecnología también es ventajosa para las inductancias 14, 15 y 32.

La inductancia 32 puede escogerse más pequeña, o incluso eliminarse totalmente siempre que el conductor al electrodo y la inductancia parásita del transformador de aislamiento 27 ya comprenda inductancia adecuada. La inductancia es necesaria para separación de canales cuando se superponen múltiples canales generadores en la pulsación de un electrodo.

En las FIGs. 7, 8 y 9 se citan MOSFETs e IGBTs como los elementos conmutadores 10 a 36. Esto no es una elección obligatoria y puede ser alterada por alguien experto en la materia de acuerdo con los requisitos específicos. Para la disposición de los elementos conmutadores 29, 30, 34, 36 y los diodos 28, 31, 33, 35 del inversor 28-32 tal como se muestra en la FIG. 9 existen, asimismo, alternativas. Así, por ejemplo, el elemento conmutador 29 con el elemento conmutador 30 en la dirección opuesta pueden estar conectados en serie, con los diodos 28 y 31 paralelos a los mismos en la dirección opuesta correspondiente. Aquí también, alguien experto en la materia escogerá la variante más favorable en conjunto para el requisito en cada caso.

Los elementos conmutadores 18, 19, 24, 26, 29, 30, 34, 36 están sometidos sólo a pérdidas en polarización directa, es decir, cada uno de ellos es activado con corriente cero porque cada semionda sinusoidal comienza con corriente cero y, de ese modo, el producto de tensión y corriente (en otras palabras, la pérdida de potencia durante la conmutación) es asimismo cero. Para la desconexión, la situación es incluso más favorable, ya que para este momento tanto la corriente como la tensión ascienden a cero, porque la tensión es bloqueada por un diodo en serie 23, 25, 28, 31, 33, 35 correspondiente.

Las señales necesarias para controlar todos los elementos conmutadores 10, 11, 16, 17, 18, 19, 24, 26, 29, 30, 34, 36 son proporcionadas por un controlador (FPGA en la FIG. 10) a través de circuitos de accionamiento desacoplados de CC (no mostrados).

Como resulta evidente a partir de la FIG. 6, una fuente de corriente bipolar 6-17 que simplemente necesita cargar un único condensador de impulsos 22 estaría tasado insuficientemente debido al corto tiempo de carga t_{chrg} . Por lo tanto, la FIG. 10 ilustra un módulo generador en una configuración multicanal, todos los canales del cual son

descargados dentro de la misma separación entre electrodos (como alternativa, algunos o todos los canales también podrían ser descargados dentro de una pluralidad de separaciones entre electrodos diferentes). Este módulo generador está constituido sólo por una fuente de corriente bipolar BCS (como se muestra en la FIG. 7) con las entradas V_{dc+}, 0 V y V_{dc-} así como un controlador FPGA conectado por un enlace de datos (ENLACE) al nodo 5 (el nodo 5 tal como se muestra en la FIG. 1). El controlador (FPGA) es preferentemente una matriz de puertas programable in situ, es decir, un circuito lógico configurable digital que también puede ser configurado por el enlace de datos (ENLACE) y alimentado con ajustes variables, siendo posible incluso cargar una nueva configuración durante el funcionamiento del sistema. Por esto es por lo que estos circuitos consiguen la máxima flexibilidad funcional y gracias al procesamiento de datos en paralelo son significativamente más rápidos que incluso los microprocesadores más rápidos disponibles. Sin embargo, si se necesita procesamiento secuencial de datos, no hay problema en implementar esto también en la FPGA, es decir, sin influir negativamente en la velocidad del procesamiento en paralelo.

Conectados a la fuente de corriente bipolar BCS están múltiples circuitos de carga/descarga CAP1 a CAP4 (tal como se muestra en las FIGs. 8, 13, 15 y 17) para los condensadores de impulsos 22 a través de los conductores I+ e I-. Cada circuito de carga/descarga CAP1 a CAP4 está conectado a un circuito inversor INV1 a INV4 (tal como se muestra en las FIGs. 9, 14, 16 y 18). Los circuitos inversores INV1 a INV4 tienen salidas separadas hacia la pieza de trabajo WS así como salidas separadas EL1 a EL4 conectadas en común a un electrodo (como alternativa, también pueden conectarse múltiples salidas individualmente o combinadas a una pluralidad de electrodos individuales).

El controlador FPGA comprende enlaces mostrados como líneas de puntos a todos los elementos conmutadores y sensores de los diversos grupos de circuitos CAP1-CAP4 e INV1-INV4. Estos simbolizan circuitos de accionamiento para accionar los elementos conmutadores pero que también monitorizan los elementos conmutadores y realizan conexiones a los sensores (como SENS de la FIG. 8, +SENS y -SENS de las FIGs. 13, 15 y 18, DSC SENS de la FIG. 14, 16 y 18). Debido a la función central del controlador FPGA es posible una coordinación ideal y monitorización del módulo generador completo sin la molestia del retardo de tiempo. Todas las condiciones, malfuncionamientos y valores detectados son señalizados por medio del enlace de datos ENLACE al nodo 5 de la FIG. 1 a medida que se producen, cíclicamente o cuando se solicita. Tal módulo puede producirse hoy en día automáticamente con los componentes SMD sin cable tal como se analiza más adelante y con los procedimientos de producción SMT.

Como estos módulos están pensados para ser instalados por todas partes en la máquina, no deben emitir calor a sus alrededores. Como la refrigeración por aire normal podría ser insuficiente para este propósito, se prefiere un sistema de refrigeración por fluido para retirar el calor disipado. Los módulos también pueden ser protegidos de los efectos ambientales severos en la máquina como suciedad, salpicaduras de agua e interferencia electromagnética mediante una carcasa densa de plásticos metalizados o, aún mejor, de metal para cumplir estos requisitos.

El controlador FPGA almacena conjuntos de datos para controlar los circuitos de descarga CAP1-CAP4 y los circuitos inversores INV1-INV4. Estos conjuntos de datos que corresponden a cada una de las formas de onda predefinidas de los diversos impulsos de descarga son almacenados precalculados en el control numérico (CNC en la FIG. 1) o son calculados en el mismo por medio de operaciones matemáticas y trigonométricas y comunicados al controlador FPGA. Como alternativa, los conjuntos de datos precalculados, por supuesto, también pueden ser almacenados en el controlador FPGA para seleccionarlos allí.

En esta disposición, una forma de onda (también denominada en este documento como forma de impulso) una vez definida en un conjunto de datos puede aumentarse o disminuirse proporcionalmente en amplitud. Con este fin, el conjunto de datos recibe sólo un factor de proporcionalidad adicional que se usa en el control numérico CNC o el controlador FPGA para aumentar o disminuir proporcionalmente, por ejemplo, todos los valores establecidos de la tensión de carga. La modificación de la amplitud del impulso de esta manera puede hacerse con cualquier resolución según se requiera.

Esto hace posible, por lo tanto, empezar con un impulso de mecanizado aproximado, reduciendo continuamente el factor de proporcionalidad, para realizar un cambio suave a un impulso de mecanizado más fino, pero proporcional en la amplitud. La aplicación de este procedimiento tiene como resultado una calidad de la pieza de trabajo más consistente con tiempo de mecanizado mínimo.

El usuario tiene la elección de seleccionar directamente una forma de impulso específica de acuerdo con su requisito de mecanizado particular, o el control numérico CNC o el controlador FPGA decide por sí mismo según sea necesario, qué forma de impulso es la más adecuada para el requisito de mecanizado momentáneo. Esta selección puede hacerse, por ejemplo, como una función de la exactitud de mecanizado deseada, el desgaste de electrodo especificado, la velocidad de mecanizado prescrita y similares. Dependiendo del requisito de la máquina particular, alguien con experiencia media en la materia es consciente de una diversidad de formas de impulso, además de las descritas detalladamente en este documento. En lo que viene a continuación, se describen algunas formas de impulso conocidas y novedosas y sus síntesis partiendo de los impulsos parciales de los condensadores de

impulsos 22.

Además, se entiende que la siguiente discusión está basada en impulsos parciales en forma de una semionda sinusoidal tal como aparece aproximadamente en la descarga de un condensador (en este caso, el condensador de impulsos 22) a través de una inductancia (en este caso, particularmente el transformador de aislamiento 27, la inductancia 32 y el conductor que conecta el electrodo). Cuando se introducen otros elementos en el circuito de descarga que conecta el electrodo, los impulsos parciales pueden desviarse de una forma de semionda sinusoidal.

La curva de tensión en el condensador de impulsos 22 contiene una diversidad de información útil directa e indirecta en cuanto a la condición de carga, los impulsos de descarga y la condición de la separación entre electrodos.

La FIG. 11 ilustra una primera realización para el sensor (como SENS de la FIG. 8, +SENS y -SENS de las FIGs. 13, 15 y 18, DSC SENS de la FIG. 13, 14, 16 y 18) para obtener indirectamente la corriente de descarga. Un circuito diferenciador conocido que comprende el condensador diferenciador 37, el amplificador operacional 38 y la resistencia de realimentación 39 pueden simular proporcionalmente la forma de la corriente de descarga en su salida en forma de la variación a lo largo del tiempo de una señal de tensión Udiff.

La curva de la corriente de descarga I como función del tiempo viene dada por la ecuación:

$$I = C * dU/dt \quad (2)$$

donde C es la capacitancia del condensador de impulsos 22, y dU/dt corresponde a la tensión de carga Uc en el condensador de impulsos 22 derivada como función del tiempo. El sensor reconoce luego la corriente de acuerdo con la ecuación del amplificador diferencial:

$$U \text{ diff} = -R39 * C37 * dU/dt \quad (3)$$

donde R39 es la resistencia de realimentación 39, C37 es el condensador diferencial 37 y dU/dt corresponde a su vez a la tensión de carga Uc en el condensador de impulsos 22 derivada como función del tiempo. Como tanto C, así como R39 y C37 son constantes, la salida Udiff es una imagen proporcional verdadera de la corriente de descarga I.

Los circuitos subsiguientes (no mostrados), por ejemplo amplificadores de muestreo y retención, integradores, comparadores y convertidores analógico/digitales como los conocidos por alguien experto en la materia, pueden extraer de la señal Udiff una diversidad de información útil como la duración del impulso, la corriente de pico, el valor cuadrático medio de la corriente, etc., todo lo cual se envía en forma digital al controlador FPGA. La obtención de información de esta manera es más directa, más rápida, más compacta, más económica y con menos pérdida que las soluciones conocidas que implican medir resistencias y sensores de corriente, siendo particularmente sencillo integrar esto en el concepto general del módulo generador. El solicitante se reserva reivindicar la protección para la construcción del sensor tal como se describe anteriormente o más adelante independientemente de otras características desveladas en este documento.

La FIG. 12 ilustra una realización del sensor SENS para medir Uout de la tensión de carga Uc del condensador de impulsos 22. Un divisor de tensión que comprende las resistencias 40 y 42 divide la tensión de carga Uc hasta un valor tal que luego es reproducido como una señal de baja impedancia Uout por un amplificador operacional 44 en la configuración de seguidor de tensiones.

Para no descargar innecesariamente el condensador de impulsos 22, el valor de las resistencias 40 se selecciona típicamente en el intervalo de MΩ de un solo dígito. Se asegura una reproducción sin distorsión de las componentes de alta frecuencia de la tensión de carga Uc mediante un divisor de tensión capacitivo en paralelo a la misma, que comprende los condensadores adaptados 41 y 43. El procesamiento adicional es análogo al del sensor de corriente descrito anteriormente.

Además de las señales de control para la fuente de corriente bipolar 8-17, también puede obtenerse una tensión de ignición de chispa (tal como se describe en las Actas del 13^{er} ISEM Vol. 1, Bilbao 2001, páginas 3 a 19) promediada a lo largo de la duración del impulso, por ejemplo, a partir de la tensión de carga Uc del condensador de impulsos 22. Debido a la caída de tensión inductiva a través del hilo esta cantidad apenas puede ser medida con procedimientos de medición de corriente en una máquina de corte por hilo.

Es suficiente con un amplificador de muestreo y retención memorizar la tensión de carga U_chrg (Figs. 5, 6) antes de la descarga, para formar la diferencia con la tensión de carga residual U_end después de la descarga y multiplicar el resultado después de una amplificación de 0,5. A partir de la tensión media de ignición de chispa, tal información útil en cuanto a cortocircuitos, descarga con el doble de la tensión de ignición (que significa mal contacto de corriente en el electrodo de hilo), descargas resistivas (que significa mal limpieza), etc. en cuanto a cómo puede

obtenerse el procedimiento al progresar en tiempo real lo cual luego puede usarse a su vez en control y optimización de bucle abierto y cerrado.

La Fig. 13 ilustra una primera realización de un circuito de carga/descarga 18-26 para generar tensión de encendido que es de construcción similar al circuito de carga/descarga 18-26 para generar el impulso de descarga tal como se muestra en la Fig. 8. Como al generar una tensión de encendido el condensador de impulsos 22 no se descarga, o lo hace sólo de manera insignificante, es dividido en un condensador de impulsos cargado positivamente 47 y un condensador de impulsos cargado negativamente 48. La tensión de polaridad positiva y negativa proporcionada por los dos condensadores de impulsos 47 y 48 es conmutada luego alternativamente al devanado primario del transformador de aislamiento 27 al que tiene que suministrarse una tensión de CA.

Como alternativa, podría usarse sólo un condensador de impulsos 22 y la tensión de CA necesaria generada por medio de elementos conmutadores adicionales o por medio de un segundo devanado primario del transformador de aislamiento.

Análogamente a la rama del circuito de polaridad positiva tal como se muestra en la Fig. 8, en la rama del circuito de polaridad negativa el elemento conmutador 19 y el diodo 21 están conectados correspondientemente al condensador de impulsos negativos 48, aplicándose lo mismo al elemento conmutador 26 y el diodo 25.

El sensor +SENS y -SENS está provisto asimismo para ambos condensadores de impulsos 47, 48, estando conectados los diodos 23 y 25 en paralelo a los elementos conmutadores 24, 25. Esto es ventajoso porque cualquier sobretensión debida a oscilaciones procedentes de la separación entre electrodos puede recuperarse en los condensadores de impulsos 47, 48.

La recuperación de energía se puede controlar dependiendo de si para un impulso sólo está o están activadas una dirección de corriente del circuito inversor (por ejemplo, sólo el elemento conmutador 30 con el diodo 28 tal como se muestra en la Fig. 14, sin recuperación) o ambas direcciones de corriente (por ejemplo, el elemento conmutador 30 con el diodo 28, y el elemento conmutador 29 con el diodo 31, tal como se muestra en la Fig. 14, con la recuperación deseada).

El circuito tal como se muestra en la Fig. 13 además comprende una resistencia de adaptación 49 para adaptar pasivamente la impedancia de salida del terminal T_{pr} a la respuesta de alta frecuencia del transformador de aislamiento 27 por modos y medios conocidos. Puede hacerse uso además de esta resistencia de adaptación 49 para detectar la condición de la separación entre electrodos. Más particularmente, con un sensor de descarga adicional DSC SENS (tal como se muestra en la Fig. 12) el comienzo de una descarga puede ser detectado con retardo nulo y a bajo coste. Como alternativa, este sensor de descarga DSC SENS puede aplicarse directamente a la salida de la fuente de tensión de encendido tal como se indica en la Fig. 14 y la Fig. 16. La ventaja de ello es detectar, independientemente de la condición de los diversos elementos conmutadores, la desventaja es ser confrontada con mayor ruido.

La Fig. 14 ilustra un circuito inversor 28-36 que corresponde al mostrado en la Fig. 9 excepto que la inductancia 32 es reemplazada por una resistencia de adaptación adicional 50. Esta resistencia de adaptación 50 también sirve, principalmente, para adaptar pasivamente la impedancia de salida del circuito inversor 28-36 a la respuesta de alta frecuencia de la separación entre electrodos. Sin embargo, la resistencia de adaptación 50 también puede servir para descargar la separación entre electrodos durante las pausas entre impulsos siendo conectados los elementos conmutadores 29, 30, 34 y 36 durante las pausas entre impulsos.

Asimismo, es posible conmutar una contratensión a la separación entre electrodos durante las pausas entre impulsos con el objeto de minimizar la tensión media de la tensión de electroerosión. Este procedimiento es ventajoso cuando se usan dieléctricos acuosos.

Suponiendo ahora que para un módulo generador tal como se muestra en la Fig. 10 el primer canal CAP1, INV1 está configurado como el canal generador de tensión de encendido de acuerdo con las Figs. 13 y 14, los canales restantes CAP2-4, INV 2-4 están configurados como canales de corriente de descarga de acuerdo con las Figs. 8 y 9.

Cuando se empieza a mecanizar, todos los condensadores de impulsos 22 son cargados en primer lugar a través de la fuente de corriente bipolar 8-17 (Fig. 7) a una tensión de carga suficiente para alcanzar una amplitud de corriente deseada. El condensador de impulsos positivos 47 y el condensador de impulsos negativos 48 son cargados a las mismas tensiones de carga positiva y negativa para generar una tensión de encendido deseada como una función no sólo de las tensiones de carga citadas sino también, entre otras cosas, de la relación del número de devanados del transformador de aislamiento 27.

Durante la duración del impulso, y sólo mientras no se produzca descarga en la separación entre electrodos, los

5 elementos conmutadores 24, 25 del canal generador de tensión de encendido CAP1, INV1 son conectados alternativamente. Preferentemente, el coeficiente de utilización es aproximadamente el 50% para no cargar el transformador de aislamiento 27 con una componente de tensión de CC cuando sea posible. La frecuencia de conmutación es adaptada preferentemente al transformador de aislamiento 27 para no exceder la integral de tensión-tiempo permisible y para mantener pequeña la corriente de magnetización de manera que no se produzca reducción significativa de la tensión de encendido. Por esto es por lo que el transformador de aislamiento 27 del canal generador de tensión de encendido CAP1, INV1 se configura ventajosamente con una inductancia principal elevada, es decir, con un número elevado de devanados del transformador de aislamiento 27.

10 Durante la duración del impulso, y siempre que no se produzca descarga, los elementos conmutadores de la polaridad deseada, por ejemplo 30 y 36 del circuito inversor 28-35, son activados según una primera realización. En otra realización, puede generarse una tensión de CA de frecuencia opcional conectando correspondientemente los elementos conmutadores 30 y 36 así como el 29 y el 34 durante un impulso de electroerosión o desde uno de tales impulsos hasta el siguiente. Por ejemplo, durante un impulso de electroerosión la polaridad de dicha tensión de encendido podría invertirse una vez o varias veces antes del encendido. Además, durante las pausas entre impulsos entre dichos impulsos de electroerosión, podría aplicarse a dicha separación entre electrodos una tensión que tenga una polaridad opuesta a dicha polaridad de dicha tensión de encendido.

20 Cuando el sensor de descarga DSC SENS detecta una descarga, el canal generador de tensión de encendido CAP1, INV1 se desconecta y los canales generadores de corriente de descarga restantes CAP2-4, INV2-4 generan el impulso de descarga deseado. Como la amplitud de corriente es una función directa de la tensión de carga del condensador de impulsos 22, también pueden generarse pequeñas corrientes de impulsos por el canal generador de tensión de encendido CAP1, INV1 del orden de 2 A y menos.

25 La tensión de encendido puede establecerse muy bien mediante la fuente de corriente bipolar 8-17 (Fig. 7) y la tensión de carga e incluso puede cambiarse durante un impulso. La tensión de carga medida en los sensores +SENS, -SENS es comparada continuamente con un valor establecido y, cuando es necesario, corregida mediante la fuente de corriente bipolar 8-17. En particular, la carga se suspende cuando dicha tensión medida excede un valor máximo establecido y la carga se reanuda cuando dicha tensión de carga medida cae por debajo de un valor mínimo establecido. La eficiencia permanece elevada sin cambiar debido al hecho de que el canal generador de tensión de encendido CAP1, INV1 sólo tiene que proporcionar una tensión, pero no corriente.

35 La Fig. 15 ilustra una realización adicional del circuito de carga/descarga para un canal generador de tensión de encendido que también puede proporcionar corrientes de impulsos más pequeñas con buena eficiencia. A diferencia del circuito de carga/descarga tal como el mostrado en la Fig. 13, de nuevo se duplica el número de condensadores de impulsos. Los condensadores de impulsos positivos y negativos 47, 48 se mantienen relativamente pequeños (comprendidos entre 100 pF y 100 nF) y sirven para establecer la tensión de encendido. A través de los diodos 55, 56, mayores condensadores de impulsos 53, 54 (comprendidos entre 1 µF y 1000 µF) están conectados en paralelo a los mismos. Estos sirven para establecer la corriente de descarga y pueden cargarse por medio de elementos conmutadores 59, 60 y diodos 57, 58 adicionales independientemente de la tensión de encendido. En esta realización, los elementos conmutadores 24, 26 forman junto con las resistencias de medición de corriente 51, 52 fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52. Estas fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 tienen la tarea primaria de mantener la corriente de descarga en el valor establecido deseado durante el corto tiempo de transición en el que, después del comienzo de la descarga, la corriente de impulso descarga los condensadores de impulsos de baja capacidad 47, 48.

50 Las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 también pueden servir, sin embargo, para modular la corriente de descarga al generar así, por ejemplo, impulsos de electroerosión inclinados, o impulsos de electroerosión que tienen una ondulación de frecuencia opcional, o impulsos puntiagudos. Para estos casos, es suficiente suministrar a las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 señales de valores establecidos con forma correspondiente (desde el FPGA, por ejemplo).

55 Además, las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 pueden usarse para dar forma a la tensión del impulso de encendido, por ejemplo, permitiendo una corriente más elevada al comienzo del impulso de electroerosión para lograr una subida de tensión más pronunciada. Después de un tiempo definido la corriente puede reducirse entonces para lograr estabilización asintótica a la tensión de circuito abierto deseada. Es más, para una eficiencia ideal los condensadores pequeños 47, 48 pueden seleccionarse de manera que su carga sea suficiente para permitir que la tensión de encendido de la separación entre electrodos se estabilice justo en el valor establecido cuando las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 están saturadas.

60 Cuando, tal como se muestra en la Fig. 15, la tensión de carga de los condensadores de impulsos 47 y 48 se vuelve menor que la tensión de carga de los condensadores de impulsos grandes 53, 54, los diodos 55 y 56 respectivamente se vuelven conductores y la corriente es proporcionada entonces desde estos condensadores de impulsos 53, 54. Los condensadores de impulsos 53, 54 son cargados sólo tan alto (por ejemplo, en el intervalo de

30 V a 50 V, preferentemente a 30 V) que las fuentes de corriente 24, 51 y 26, 52 sólo se saturan en funcionamiento normal, es decir, que sólo se produce una caída de tensión muy pequeña de unos pocos voltios (preferentemente menos del 50%, más preferentemente menos del 20% en relación con la tensión de carga) a través de estas fuentes de tensión 24, 51 y 26, 52. Además, durante el impulso de electroerosión la tensión de carga de los condensadores de impulsos grandes 53, 54 después del encendido se controla de manera que la diferencia de la tensión aplicada a dicha separación entre electrodos menos dicha tensión de carga es igual a un valor establecido específico preferible comprendido entre 5 V y 25 V. Para una tensión de carga de 30 V y una caída de tensión de 5 V con corriente de impulso de 3 A, la pérdida de potencia es 15 W, mientras que en la separación entre electrodos la potencia disponible es 25 V por 3 A, en otras palabras, 75 W, que corresponden a una eficiencia (para cada coeficiente de utilización) de más del 83% para las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52. En contraste, la eficiencia de las fuentes de tipo de regulador de CC es menos del 10%, particularmente con impulsos cortos que tienen corrientes de impulsos más bien pequeñas y pausas prolongadas. La razón para esto es el elevado requisito estructural para tensiones de alimentación auxiliar y circuitos reguladores, así como debido a la conmutación y las pérdidas de potencia (un diodo solo que se encarga de una corriente de reserva de 3 A ya tendrá como resultado pérdidas de aproximadamente 5 W).

La Fig. 16 ilustra un circuito inversor adaptado al circuito de carga/descarga de la Fig. 15. En este caso, los diodos 28, 31, 33, 35 forman un circuito puente que carga los condensadores de filtro 61, 62 positiva y negativamente, respectivamente. Estos condensadores de filtro 61, 62 se seleccionan con pequeña capacitancia y tienen simplemente la tarea de cerrar los breves espacios de tensión y corriente que han resultado de la tensión de CA procedente del transformador de aislamiento 27 debido a la rectificación. Seleccionando la capacitancia parásita y la inductancia parásita lo suficientemente elevadas en el circuito de descarga, pueden eliminarse los condensadores de filtro 61, 62.

En la salida están provistos los elementos conmutadores 30, 34 que son capaces de conmutar entre las dos polaridades muy rápidamente, permitiendo, por ejemplo, la generación de impulsos de encendido de CA de frecuencia opcional o una tensión de encendido positiva alternando con una corriente de descarga negativa. En general, la polaridad de dicha corriente de descarga podría seleccionarse como una función de la polaridad de dicha tensión de encendido.

Los elementos conmutadores 30, 34 vienen seguidos, a su vez, por una impedancia de adaptación 32, 50 para adaptación de alta frecuencia del generador de tensión de encendido a la separación entre electrodos. Preferentemente, se coloca una pequeña resistencia de CC y se conecta una pequeña inductancia 32 en paralelo con la resistencia de adaptación 50 para maximizar la eficiencia global del generador de tensión de encendido.

Las Figs. 17 y 18 ilustran otra realización de un generador de tensión de encendido que además de la tensión de encendido también proporciona corrientes de descarga más bien pequeñas. El principio básico tal como se muestra en las Figs. 15 y 16 es aquí el mismo, excepto que en lugar de los condensadores de impulsos 47, 48, 53, 54, simplemente se usan los condensadores de filtro 61, 62 en el lado secundario para generación de tensión y corriente de impulso y, de este modo, sirven como los condensadores de impulsos (47 y 48 en las Figs. 13 y 15). Estos condensadores de filtro 61, 62 tienen que ser dimensionados algo más grandes que los mostrados en la Fig. 16 para un mejor rendimiento en el control dinámico de la tensión de carga mediante un compromiso entre eficiencia maximizada y una modesta frecuencia de conmutación.

En este caso, concretamente, los condensadores de filtro 61, 62 son cargados directamente por la fuente de corriente bipolar 8-17 (Fig. 7) y por medio de los elementos conmutadores 18, 19, el transformador de aislamiento 27 y el puente de diodos 28, 31, 33, 35. En esta disposición, los elementos conmutadores 18, 19 son conectados alternativamente de manera que el transformador de aislamiento 27 es cargado sólo por una tensión de CA. El puente de diodos 28, 31, 33, 35 reparte uniformemente cada impulso de carga en el condensador de filtro positivo 61 y el condensador de filtro negativo 62. Puede inhibirse el reparto automático añadiendo a cada diodo del puente de diodos 28, 31, 33, 35 un elemento conmutador al permitir así que los condensadores de filtro 61, 62 sean cargados a diferentes tensiones según pueda ser necesario para aplicaciones especiales.

Los sensores de tensión de carga (+SENS, -SENS) están incluidos en este caso en el circuito inversor, aplicándose lo mismo a las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 que sustituyen los elementos conmutadores 30, 34 al ocuparse además de la tarea de aplicar los impulsos de electroerosión a la separación entre electrodos con polaridad correcta. En este caso, las fuentes de corriente lineal 24, 51 y 26, 52 pueden ocuparse además de otras tareas como dar forma a la tensión de encendido y la corriente de descarga, pero también activar la adaptación a la respuesta de alta frecuencia de la separación entre electrodos (las fuentes de corriente lineal pueden ser moduladas muy rápidamente en su resistencia). Si no, la función del circuito es básicamente la misma que se describió y tal como se muestra en las Figs. 15 y 16.

Aunque esta realización es de coste inferior, debido al compromiso de usar sólo una capacitancia, cada una para regulación de tensión y corriente, su eficiencia es menor que en las realizaciones precedentes. Además, el ruido en

los sensores (+SENS, -SENS, DSC SENS) es más elevado.

Las Figs. 19a a 19c ilustran tres impulsos parciales sinusoidales procedentes de tres condensadores de impulsos 22 con una duración de 180° y una amplitud igual a 1 que son descargados en sincronismo dentro de la separación entre electrodos. El impulso resultante de la Fig. 19d tiene asimismo una duración de 180° pero una amplitud de 3.

Los valores eléctricos correspondientes en el intervalo de la corriente y el tiempo podrían, por ejemplo, ascender a 300 A y $1,8 \mu\text{s}$ para el impulso de descarga resultante. La proporcionalidad se calcula a partir de los elementos que determinan el tiempo y la amplitud, concretamente la capacitancia, la inductancia y la tensión de carga.

Activar más canales en sincronismo aumentaría en la misma medida la amplitud mientras que el tiempo sigue siendo aproximadamente el mismo. Más exactamente, el tiempo aumentaría ligeramente tal como se causa por la componente de inductancia en el espacio de trabajo (por ejemplo, la inductancia del electrodo de hilo) común a todos los canales. La amplitud de cada impulso parcial puede establecerse para cada canal por medio de la tensión de carga con alta resolución y sin influir en la duración del impulso.

La duración del impulso de cada impulso parcial se establece preferentemente por el valor para la capacidad del condensador de impulsos 22. Se lograría reducir a la mitad el tiempo del impulso, como es sabido, con un valor cuatro veces menor para la capacitancia del condensador de impulsos 22. Mantener la amplitud requeriría duplicar la tensión de carga.

Lo que también tiene una influencia directa sobre la duración del impulso es la inductancia resultante del circuito de descarga que aquí está constituida por la inductancia parásita del transformador de aislamiento 27, la inductancia 32 y la inductancia del espacio de trabajo. Estas componentes son algo menos adecuadas para ser configuradas variables y, preferentemente, se mantienen lo más pequeñas que sea posible.

Las Figs. 20a, b ilustran dos impulsos, ambos de una duración más corta de 108° , desfasados 120° pero que presentan una amplitud de 3. La suma de los impulsos tal como se muestra en la Fig. 20c tiene una duración del impulso de 180° y una amplitud de 3, pero la integración indica que el contenido del área es el 20% superior. Además, la subida del impulso de 0° a 30° es el 53% más pronunciada que con la forma de onda tal como se muestra en la Fig. 19. Esta forma de onda simula la descarga de una línea de retardo en la que un número infinito de elementos de línea de capacitancia infinitamente pequeña e inductancia infinitamente pequeña son descargados uno tras otro, teniendo como resultado un impulso de onda cuadrada absolutamente perfecta. Aquí, este enfoque infinitesimal es de menos interés que el principio de un desplazamiento de tiempo constante entre impulsos individuales. Cualquier número de más de tres impulsos individuales no produce más que mejoras marginales en el contenido del área y la pendiente de los frentes del impulso en total pero aumenta la frecuencia de funcionamiento del generador.

Las Figs. 21a-d ilustran una composición de impulsos en la que un impulso de duración $1/3$ y amplitud 1,2 en la Fig. 21c se añade al comienzo y al final de cada uno de dos impulsos en sincronismo con una amplitud 1,5 (también podría ser un único impulso con una amplitud de 3). Aquí, el contenido del área se incrementa el 26% y la subida del impulso de 0° a 30° es incluso el 80% mejor que en la forma de onda mostrada en la Fig. 19.

Esta composición de impulsos está orientada en el principio de análisis armónico basado en la serie de Fourier o la teoría de trenes de ondas y puede continuarse mediante más impulsos adicionales cada vez más cortos que tienen una cierta amplitud reducida hasta un impulso de descarga de onda casi cuadrada. Aquí también existen, por supuesto, límites naturales donde las mejoras se vuelven insignificantes y las duraciones de los impulsos parciales se vuelven tan cortas que el gasto adicional ya no merece la pena. La teoría de trenes de ondas es adecuadamente para formas de señales discontinuas y se describe detalladamente en "An Introduction to Wavelets", por Amara Graps en www.amara.com/IEEEwave/IEEEwavelet.html.

Las Figs. 22a-d ilustran una composición de impulsos adicional para corte por hilo basada en el principio de la línea de retardo. Como resulta evidente a partir de la Fig. 22d, tres impulsos desfasados 120° con una amplitud de 3 tienen como resultado un área del impulso el 29% mayor y un frente delantero el 88% más pronunciado mejor que en la forma de onda tal como se muestra en la Fig. 19.

Las ventajas de mayores áreas del impulso radican en la mayor velocidad de eliminación de material por impulso. Además, cuanto más pronunciados son los frentes del impulso, más alta es la temperatura del plasma al comienzo de la descarga y más fuerte es el efecto de cavitación al final de la descarga. Ambos fenómenos reducen el daño en la superficie de la pieza de trabajo y aumentan asimismo la velocidad de eliminación de material. El efecto de cavitación en electroerosión (EDM) se entiende que es un mecanismo adicional de eliminación de material como resultado del cual elevadas fuerzas de implosión cuando el canal de plasma implosiona al final de la descarga que es todavía más efectiva cuanto más rápido se desconecta el impulso.

Las Figs. 23a-d ilustran la síntesis de un impulso de descarga para electroerosión por penetración en la que se genera un impulso de descarga a partir de 6 impulsos parciales, desfasado cada uno 120° de acuerdo con el principio de la línea de retardo, siendo la ondulación en el impulso de descarga sólo aproximadamente el 10,6%. Por simplicidad, la ondulación en % se expresa por la relación

$$5 \quad \text{Ondulación [\%]} = 100 \cdot (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max} \quad (4)$$

representando I_{\max} e I_{\min} las amplitudes máxima y mínima, respectivamente, de la corriente de descarga. Es interesante que la ondulación del 10,6% se aplica a cada amplitud del impulso. Esto es particularmente ventajoso para pequeñas corrientes de impulsos donde los generadores de electroerosión por penetración conocidos estarían excesivamente puestos a prueba debido a la frecuencia de conmutación excesivamente elevada para regulación de corriente.

Las Figs. 24a-e ilustran cómo puede influirse en la ondulación del impulso de descarga disminuyendo (o aumentando) el desfase de los impulsos parciales. Un desfase de 90° tiene como resultado una ondulación del 27,3%. Entonces la amplitud simplemente tiene que ser 0,7 para lograr una amplitud suma de 1.

Los impulsos de electroerosión por penetración tal como se muestran en las Figs. 23a-d y 24a-e podrían optimizarse para los mejores resultados de mecanizado; siendo el frente delantero demasiado pronunciado (desgaste del electrodo) y el frente posterior demasiado suave (escaso efecto de cavitación).

Las Figs. 25a-e ilustran cómo optimizar más los impulsos de descarga. Mediante una combinación del principio de la línea de retardo con impulsos más anchos y análisis armónico o el principio de trenes de ondas al final del impulso pueden eliminarse las dos deficiencias anteriormente mencionadas. Para finales de impulsos aún más pronunciados, en este caso podrían incluirse adicionalmente uno o más armónicos.

Un principio interesante de aumento del efecto de cavitación se describe en el documento SU 308 846. Mediante un impulso de sobretensión al final del impulso, se aumenta significativamente la velocidad de eliminación de material en tanto que logrando formación de cráteres menos profunda con el resultado de mejor rugosidad y una anchura de separación más estrecha con la ventaja de producir piezas de trabajo de mejor calidad en menor tiempo.

Las Figs. 26a-e ilustran cómo pueden generarse tales impulsos de descarga. También en este caso, modificando el desfase de los impulsos parciales y sus duraciones de los impulsos, pueden dimensionarse libremente la ondulación y el tiempo de subida del impulso de descarga con la ventaja, comparada con el documento SU 308 846, de mayor libertad al dimensionar la amplitud y duración del impulso de sobretensión.

Las Figs. 27a-e ilustran una forma de impulso novedosa que permite un aumento adicional del efecto de cavitación. Esta forma de impulso novedosa logra un frente posterior casi perpendicular al final del impulso con subimpulso subsiguiente de amplitud y duración seleccionables en la dirección opuesta. Sin embargo, ventajosamente, la duración del subimpulso no se selecciona demasiado prolongada para no causar desgaste innecesario del electrodo. Una duración demasiado corta del subimpulso tiene como resultado que la descarga en el cruce de tensión cero de la separación entre electrodos se extingue a partir del agotamiento de energía, provocando una tensión en vacío invertida después de la descarga. Tal tensión en vacío invertida puede ser ventajosa cuando se intenta evitar la electrolisis (corrosión de la pieza de trabajo y formación de gas oxhídrico) cuando se emplean dieléctricos acuosos.

Este ejemplo hace uso de la flexibilidad al seleccionar libremente la polaridad también durante un impulso parcial. El impulso parcial al final del impulso (véase la Fig. 27d) es más elevado, más corto y de polaridad opuesta a la de los otros impulsos parciales. Dependiendo de cómo se relaciona con los otros impulsos parciales (Figs. 27a-c), el condensador de impulsos 22 de este canal apenas habrá perdido algo de energía en la descarga, es más, incluso puede ganar energía, ya que absorbe parte de la energía de estos impulsos. En otras palabras, siendo posible también recuperar energía de la separación entre electrodos de vuelta al generador.

La ecuación (1) tiene que ser desarrollada para el caso de recuperación de la siguiente manera:

$$55 \quad U_{\text{end}} = -U_{\text{chrg}} - 2 \cdot U_{\text{gap}} \cdot (2 \cdot t_R / T - 1) \quad (5)$$

donde t_R (tiempo de recuperación) representa la duración de tiempo durante la cual un impulso parcial invertido (Fig. 27d) reduce la tensión de separación U_{gap} . En otras palabras, t_R corresponde a la duración entre el comienzo del impulso parcial invertido (Fig. 27d) y el momento de cruce por cero del impulso de descarga (Fig. 27a), T define la duración del impulso parcial invertido (Fig. 27d).

Cuando $t_R = 0$ tenemos de nuevo la ecuación conocida tal como se citó anteriormente. Cuando $t_R = 0,5T$ en total no se emite energía a la separación entre electrodos:

$$U_{\text{end}} = -U_{\text{chrg}} \quad (6)$$

Y cuando $t_R = T$, la energía máxima procedente de la separación entre electrodos es reflejada de vuelta al condensador de impulsos 22:

$$U_{\text{end}} = -U_{\text{chrg}} - 2*U_{\text{gap}} \quad (7)$$

En estos tres puntos extremos la ecuación (5) es precisa. Para otros valores intermedios de t_R su validez aún podría demostrarse mediante una ecuación diferencial general. Pero para dimensionar el circuito estos tres valores extremos son totalmente suficientes.

El exceso de tensión de carga se reduce al valor establecido seleccionando correspondientemente la dirección de la corriente a la fuente de corriente bipolar (Fig. 7) y de este modo puede recuperarse en los condensadores 8, 9. Para el modo de "recuperación", los diodos 12 y 13 podrían sustituirse ventajosamente por elementos conmutadores (por ejemplo, MOSFETs) que, como aprovechamiento adicional, tendría como resultado una eficiencia mejorada al almacenar la energía en las inductancias 14 y 15. Las pérdidas en polarización directa de un elemento conmutador de tipo MOSFET pueden mantenerse sustancialmente menores, concretamente, que las de un diodo. Además, el circuito de carga 18 a 21 tal como se muestra en la Fig. 8 podría estar configurado para ambas direcciones de corriente para permitir el flujo de energía en ambas direcciones.

Las Figs. 28a-e ilustran en general cómo la forma de onda de un impulso de descarga puede ser modulada arbitrariamente mediante la duración, amplitud y desfase de los impulsos parciales individuales en forma de semiondas sinusoidales. La Fig. 28a muestra un primer impulso parcial con una duración de 144° , una amplitud de 0,4 que comienza en 0° . La Fig. 28b muestra un segundo impulso parcial con duración de 144° , una amplitud de 0,7 que está retardado 96° , y la Fig. 28c muestra un tercer impulso con duración de 144° , una amplitud de 1 y un retardo de 192° . El cuarto impulso parcial de la Fig. 28d que tiene una duración de 60° , amplitud de 0,5 y retardo de 287° tiene una duración del impulso más corta y se adapta por el principio de análisis armónico. Como resultado, la Fig. 28e muestra un impulso de erosión especial cuya amplitud aumenta linealmente con la duración (poco desgaste del electrodo) y un frente de impulso de descenso pronunciado (elevada velocidad de eliminación de material).

Es evidente que los diversos conceptos individuales tal como se describen anteriormente para dar forma al impulso pueden usarse en cualquier combinación deseada. Aunque esto aumenta la complejidad de los diagramas de temporización y los valores establecidos para todos los elementos conmutadores y sensores de un módulo generador, pueden ser calculados por el control numérico sin que el operador tenga que intervenir en su programación.

En resumen, una realización de un procedimiento y generador para generar una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión al menos un condensador de impulsos para generar el impulso de descarga es cargado con una tensión de carga y luego descargado dentro de la separación entre electrodos. Después de su descarga, el condensador de impulsos es recargado con una tensión de carga que tiene la misma polaridad que la de la tensión residual que aún existe en el condensador de impulsos después de su descarga. El condensador de impulsos es descargado luego dentro de la separación entre electrodos mediante un impulso de descarga cuya polaridad es independiente de la polaridad de la tensión de carga en el condensador de impulsos después de su recarga.

En una realización adicional de un procedimiento y generador para generar una secuencia temporal de impulsos de descarga separados entre sí por pausas entre impulsos para mecanizado por electroerosión al menos dos condensadores de impulsos son descargados cada uno en forma de un impulso parcial para formar juntos un impulso de descarga dentro de la separación entre electrodos. Un impulso de descarga que tiene una forma de onda predeterminada se selecciona a partir de una pluralidad de impulsos de descarga que tienen diferentes formas de onda predeterminadas y la descarga de los dos condensadores de impulsos es controlada de manera que el impulso de descarga seleccionado se genera con la forma de onda predeterminada.

En otra realización adicional de un procedimiento y generador para generar una secuencia temporal de impulsos de electroerosión que tienen una tensión de encendido predefinida para mecanizado por electroerosión se genera una tensión de CA a partir de una tensión de CC proporcionada por una fuente de corriente bipolar. La tensión de CA es aplicada a un transformador de aislamiento dispuesto entre la fuente de corriente bipolar y la separación entre electrodos. Un condensador de impulsos es cargado por la fuente de corriente bipolar hasta una tensión de carga que corresponde a la tensión de encendido. La tensión de encendido provista por el transformador de aislamiento es conmutada con una polaridad seleccionada a la separación entre electrodos.

Los procedimientos y generadores de impulsos descritos son adecuados para todos los mecanizados por electroerosión. Estos generadores pueden ser transformados en una configuración completa mediante una sencilla instrucción de configuración de software en un generador de electroerosión por penetración o un generador de corte

5 por hilo. La selección de la polaridad de los impulsos de electroerosión se realiza de manera puramente electrónica y, por lo tanto, puede cambiar durante un impulso de descarga, o también diferir de un impulso al siguiente abriendo así nuevos horizontes tecnológicos para el usuario. Debido a su reducida pérdida de potencia y superior frecuencia de salida, los módulos generadores pueden miniaturizarse de manera que permitan la instalación en las inmediateces directas del electrodo en la máquina. Las propiedades del impulso ya no se ven perjudicadas por el sistema de cables y además las pérdidas de potencia ahora son muchísimo menores para transmisión de CC con alta tensión. Este nuevo principio permite la aplicación de modernos procedimientos de producción automatizados para producción en masa de los módulos, teniendo como resultado una considerable reducción de costes. Este procedimiento de producción de tecnología de montaje superficial (SMT) está basado en el montaje automatizado de componentes de circuitos impresos con dispositivos montados superficialmente (SMD) sin cables.

15 El campo principal de aplicación es, por lo tanto, la generación de impulsos bien definidos de todas clases para EMD con mayor eficiencia que con otros conceptos conocidos. En todo el mecanizado por electroerosión el sistema tal como se describió anteriormente destaca en todo por la flexibilidad más elevada a la hora de cumplir los requisitos del cliente mejor y más rápido, en tanto que simplificando la implementación de todas las funciones. La producción, prueba y mantenimiento de los módulos son compatibles con los estándares internacionales, requiriendo bajos costes de material y producción al maximizar el uso de componentes del sistema tanto para corte por hilo como para electroerosión por penetración a pesar de los diferentes requisitos. Además, pueden ponerse en uso los mismos módulos para productos de gama alta y de gama baja, así como con aplicación de medios de diagnóstico estandarizados para verificación facilitada de funciones cada vez más complejas.

25 Como las demandas crecientes sobre productividad siempre más alta de los sistemas de electroerosión (EDM) están aumentando continuamente la necesidad de potencia de los generadores de impulsos, el sistema tal como se describió anteriormente puede detener esta tendencia al minimizar las pérdidas en la generación de impulsos, reduciendo aún más las pérdidas en funcionamiento en vacío en el sentido de una mejor compatibilidad medioambiental. Además, los módulos pueden miniaturizarse hasta tal punto que ahora pueden ser ubicados de la manera más adecuada para que satisfaga sus funciones, debido a que los generadores ofrecen elevada eficiencia. Las pérdidas en los cables y los costes del sistema de cables pueden reducirse ahora a un mínimo absoluto. El principio del generador puede graduarse a lo largo de una amplia gama de potencias y la configuración puede configurarse ahora de manera que son posibles variantes y modificaciones para cualquier aplicación sin mayores complicaciones y gasto.

35 Ha de entenderse que la aplicación de la invención no está limitada a los detalles de construcción y la disposición de los componentes expuestos en la anterior descripción de las realizaciones o ilustrados en los dibujos. La invención es capaz de incluir otras realizaciones o de llevarse a cabo para máquinas herramientas similares que tengan la misma función. Además, ha de entenderse que la fraseología y la terminología empleadas en este documento son a efectos de descripción y no deberían considerarse como limitadoras.

40 Aunque en este documento se han descrito ciertos dispositivos y productos construidos de acuerdo con las enseñanzas de la invención, el ámbito de cobertura de esta patente no está limitado a ellos. Por el contrario, esta patente abarca todas las realizaciones de las enseñanzas de la invención que entran dentro del ámbito de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de generación de una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión en el que al menos un condensador de impulsos (22) para generar el impulso de descarga es cargado con una tensión de carga (U_chrg) que tiene una primera polaridad y luego descargado dentro de la separación entre electrodos, **caracterizado porque** después de su descarga dicho condensador de impulsos (22) es recargado con una tensión de carga (U_chrg) que tiene una segunda polaridad, opuesta a la primera polaridad, siendo la segunda polaridad la misma polaridad que la de dicha tensión residual (U_end) que aún existe en dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga, y **porque** dicho condensador de impulsos (22) es descargado luego dentro de dicha separación entre electrodos mediante un impulso de descarga cuya polaridad es independiente de dicha segunda polaridad de dicha tensión de carga (U_chrg) en dicho condensador de impulsos (22) después de su recarga.
2. Un procedimiento de generación de una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión, en el que al menos un condensador de impulsos (22) para generar el impulso de descarga es cargado con una tensión de carga (U_chrg) y luego descargado dentro de la separación entre electrodos, **caracterizado porque** después de su descarga dicho condensador de impulsos (22) es recargado con una tensión de carga (U_chrg) que tiene dicha misma polaridad que la de dicha tensión residual (U_end) que aún existe en dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga, y **porque** dicho condensador de impulsos (22) es descargado luego dentro de dicha separación entre electrodos mediante un impulso de descarga cuya polaridad es independiente de dicha polaridad de dicha tensión de carga (U_chrg) en dicho condensador de impulsos (22) después de su recarga, en el que dicha polaridad de dicha tensión residual (U_end) y dicha tensión en dicho condensador de impulsos (22) son detectadas, y dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga es recargado por una fuente de corriente bipolar (8-17) con una tensión de recarga (U_chrg) de dicha polaridad detectada hasta que dicha tensión detectada en dicho condensador de impulsos (22) ha alcanzado un valor predefinido.
3. El procedimiento según la reivindicación 1 ó 2 en el que dicho condensador de impulsos (22) es cargado por medio de elementos conmutadores (16, 17) provistos para ambas polaridades de dicha tensión de carga (U_chrg) entre el condensador de impulsos (22) y una fuente de corriente bipolar (8-17), y el elemento conmutador (16, 17) que corresponde a la polaridad de dicha tensión de carga (U_chrg) se conecta durante un tiempo específico antes de la recarga de dicho condensador de impulsos (22) y se desconecta instantáneamente cuando se termina la recarga de dicho condensador de impulsos (22).
4. El procedimiento según la reivindicación 3 en el que dicho condensador de impulsos (22) es cargado por medio de inductancias (14, 15) provistas para ambas polaridades de dicha tensión de carga (U_chrg), y la inductancia (14, 15) que corresponde a la polaridad de la siguiente tensión de carga (U_chrg) se carga con corriente al comienzo de una descarga de dicho condensador de impulsos (22).
5. El procedimiento según la reivindicación 3 ó 4 en el que el elemento conmutador (16, 17) que corresponde a la polaridad de dicha tensión de carga (U_chrg) se conecta para cargar dicho condensador de impulsos (22) cuando la tensión de descarga de la acción de descarga previa ha alcanzado cero voltios en el condensador de impulsos (22).
6. El procedimiento según la reivindicación 4 ó 5 en el que, en particular para una baja frecuencia de descarga, la energía que queda en dichas inductancias (14, 15) de dicha fuente de corriente bipolar (8-17) es devuelta a través de diodos de recuperación (45, 46) a una fuente de tensión de CC (V_dc+, V_dc-) en el momento de la finalización de la carga de dicho condensador de impulsos (22).
7. El procedimiento según la reivindicación 4 ó 5 en el que, en particular para una alta frecuencia de descarga, la energía que queda en dichas inductancias (14, 15) de dicha fuente de corriente bipolar (8-17) se usa para la siguiente acción de carga en el momento de la finalización de la carga de dicho condensador de impulsos (22).
8. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que dicho condensador de impulsos (22) es descargado dentro de la separación entre electrodos a través de un transformador de aislamiento (27) y elementos conmutadores (24, 26) provistos para ambas polaridades de dicha tensión de descarga, y el elemento conmutador (24, 26) que corresponde a la polaridad de dicha tensión de descarga se conecta durante la duración de la descarga de dicho condensador de impulsos (22).
9. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que dicho condensador de impulsos (22) es descargado dentro de dicha separación entre electrodos a través de un transformador de aislamiento (27) con una derivación central del devanado secundario, estando conectada dicha derivación central a dicha pieza de trabajo y estando conectados los dos extremos de polaridad opuesta de dicho devanado a través de

un elemento conmutador (29, 36) en la dirección directa y un elemento conmutador (30, 34) en la dirección opuesta, respectivamente, y a través de una inductancia (32) a dicho electrodo, en el que sólo el elemento conmutador (29, 30, 34, 36) que tiene la dirección deseada y la polaridad deseada en dicho transformador de aislamiento (27) se conecta durante la duración de la descarga de dicho condensador de impulsos (22).

5 10. El procedimiento según la reivindicación 9 en el que dichos elementos conmutadores (29, 30, 34, 36) aguas abajo de dicho transformador de aislamiento (27) son controlados de manera que se generan sólo impulsos de descarga positivos, sólo impulsos de descarga negativos, impulsos de descarga negativos y positivos alternos en secuencia libre, o grupos de impulsos de descarga negativos o positivos.

10 11. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que la amplitud de corriente deseada de dicho impulso de descarga se establece mediante dicha tensión de carga y el valor de la capacitancia de dicho condensador de impulsos (22), mediante la relación de transformación de un transformador de aislamiento (27) a través del cual se descarga dicho condensador de impulsos (22) y/o mediante el número de condensadores de impulsos (22) que han de ser descargados simultáneamente cuando está provista una pluralidad de condensadores de impulsos (22) para generar un impulso de descarga.

15 12. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que la duración deseada de dicho impulso de descarga se establece mediante el valor de la capacitancia de dicho condensador de impulsos (22), mediante una inductancia (32) conectada a dicho electrodo y/o mediante el número de condensadores de impulsos (22) que han de ser descargado en secuencia cuando está provista una pluralidad de condensadores de impulsos (22) para generar un impulso de descarga.

20 13. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que una tensión de CA de entrada es rectificadora mediante un circuito inversor, la tensión rectificada se regula hasta una tensión definida, dicha tensión rectificada se regula hasta una tensión que es superior al valor máximo de dicha tensión de CA de entrada, se estabiliza una tensión neutra, se corrige un factor de potencia y/o se provoca un arranque suave de dicha tensión.

25 14. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que dicho impulso de descarga se reconoce diferenciando la tensión de descarga detectada en dicho condensador de impulsos (22) durante la descarga del mismo.

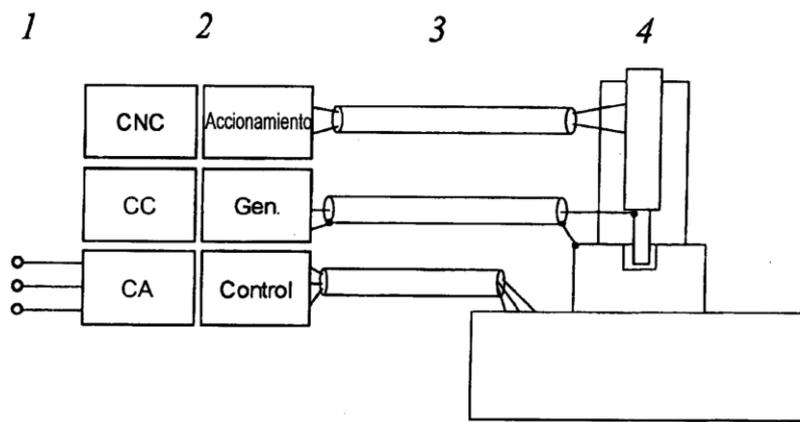
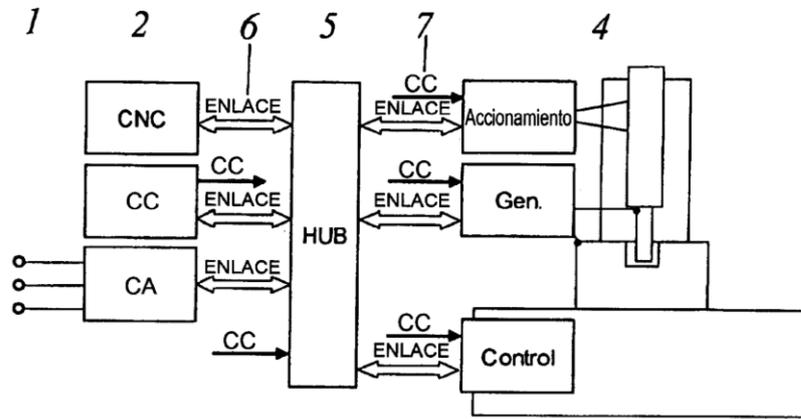
30 15. Un generador para generar una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión que comprende un circuito de carga/descarga (18-26) que tiene al menos un condensador de impulsos (22), cargando dicho circuito de carga/descarga (18-26) dicho condensador de impulsos (22) con una tensión de carga (U_chrg) que tiene una primera polaridad y luego descargándolo dentro de la separación entre electrodos para generar dicho impulso de descarga, **caracterizado porque** dicho circuito de carga/descarga (18-26) está configurado de manera que recarga dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga con una tensión de carga (U_chrg) que tiene una segunda polaridad, opuesta a la primera polaridad, siendo la segunda polaridad la misma polaridad que la de la tensión residual (U_end) que aún existe en dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga, y descarga dicho condensador de impulsos (22) dentro de la separación entre electrodos mediante un impulso de descarga cuya polaridad es independiente de la segunda polaridad de dicha tensión de carga en dicho condensador de impulsos (22) después de su recarga.

35 16. Un generador para generar una secuencia temporal de impulsos de descarga para mecanizado por electroerosión que comprende un circuito de carga/descarga (18-26) que tiene al menos un condensador de impulsos (22), cargando dicho circuito de carga/descarga (18-26) dicho condensador de impulsos (22) con una tensión de carga (U_chrg) y luego descargándolo dentro de la separación entre electrodos para generar dicho impulso de descarga, **caracterizado porque** dicho circuito de carga/descarga (18-26) está configurado de manera que recarga dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga con una tensión de carga (U_chrg) que tiene la misma polaridad que la de la tensión residual (U_end) que aún existe en dicho condensador de impulsos (22) después de su descarga, y descarga dicho condensador de impulsos (22) dentro de la separación entre electrodos mediante un impulso de descarga cuya polaridad es independiente de la polaridad de dicha tensión de carga en dicho condensador de impulsos (22) después de su recarga, en el que el generador además comprende una fuente de corriente bipolar (8-17), en el que dicho circuito de carga/descarga (18-26) comprende un sensor (SENS) para detectar la tensión del condensador en dicho condensador de impulsos (22) y para detectar la polaridad de dicha tensión residual (U_end), y dicho circuito de carga/descarga (18-26) está configurado de manera que recarga el condensador de impulsos (22) después de su descarga con una tensión de recarga (U_chrg) procedente de la fuente de corriente bipolar (8-17) de dicha polaridad detectada hasta que dicha tensión detectada en dicho condensador de impulsos (22) ha alcanzado un valor predefinido.

45 50 55 60 17. El generador según la reivindicación 16 que además comprende un circuito digital programable (FPGA) que recibe las señales detectadas procedentes de dichos sensores (SENS), y una interfaz de sistema

(ENLACE) que configura dicho circuito digital programable (FPGA) con el cual puede comunicarse bidireccionalmente.

- 5 18. El generador según la reivindicación 16 ó 17 en el que dicho circuito de carga/descarga (18-26) comprende elementos conmutadores (18, 19) provistos para ambas polaridades de dicha tensión de carga (U_chrg), y el elemento conmutador (18, 19) que corresponde a la polaridad de dicha tensión de carga (U_chrg) se conecta durante un tiempo específico antes de la recarga de dicho condensador de impulsos (22) y se desconecta instantáneamente cuando se termina la recarga de dicho condensador de impulsos (22).
- 10 19. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 16 a 18 que además comprende una fuente de tensión de CC (V_dc+, V_dc-), en el que dicha fuente de corriente bipolar (8-17) además comprende inductancias (14, 15) para ambas polaridades de dicha tensión de carga (U_chrg), y la inductancia (14, 15) que corresponde a la polaridad de la siguiente tensión de carga (U_chrg) se carga con una corriente procedente de la fuente de tensión de CC (V_dc+, V_dc-) al comienzo de una descarga de dicho condensador de impulsos (22).
- 15 20. El generador según la reivindicación 18 ó 19 en el que el elemento conmutador (18, 19) que corresponde a la polaridad de dicha tensión de carga (U_chrg) se conecta para cargar dicho condensador de impulsos (22) cuando la tensión de descarga de la acción de descarga previa ha alcanzado cero voltios en el condensador de impulsos (22).
- 20 21. El generador según la reivindicación 19 ó 20 en el que la fuente de corriente bipolar (8-17) además comprende diodos de recuperación (45, 46) para devolver la energía que queda en dichas inductancias (14, 15) a dicha fuente de tensión de CC (V_dc+, V_dc-) al terminar de cargar dicho condensador de impulsos (22).
- 25 22. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 18 a 21 que además comprende un transformador de aislamiento (27) entre dicho condensador de impulsos (22) y la separación entre electrodos, en el que el circuito de carga/descarga (18-26) incluye un elemento conmutador (24, 26) para cada polaridad de dicha tensión de descarga el que corresponde a la polaridad escogida se conecta durante la duración de la descarga de dicho condensador de impulsos (22).
- 30 23. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 22 que además comprende un transformador de aislamiento (27) con una derivación central del devanado secundario entre dicho condensador de impulsos (22) y la separación entre electrodos, estando conectada dicha derivación central a dicha pieza de trabajo y estando conectados los dos extremos de polaridad opuesta de dicho devanado a través de un elemento conmutador (29, 36) en la dirección directa y un elemento conmutador (30, 34) en la dirección opuesta, respectivamente, y a través de una inductancia (32) a dicho electrodo, teniendo sólo el elemento conmutador (29, 30, 34, 36) la polaridad deseada en dicho transformador de aislamiento (27) que se conecta durante la duración de la descarga de dicho condensador de impulsos (22).
- 35 24. El generador según la reivindicación 22 ó 23 que además comprende un sensor de descarga (DSC SENS) y segundos diodos de recuperación (63, 64) en el que el sensor de descarga (DSC SENS) detecta la aparición de una mala descarga debido a la interrupción de corriente dentro de la separación entre electrodos (EL, WS) y comunica la aparición de la mala descarga al circuito digital programable (FPGA), que está configurado para permitir desconectar inmediatamente los elementos conmutadores (24, 26) del circuito de carga/descarga (18, 26) en cuyo caso la energía almacenada dentro del circuito de descarga es recuperada mediante los diodos (63, 64) dentro de los condensadores (8, 9) de la fuente de tensión de CC (V_dc+, V_dc-).
- 45 25. El generador según la reivindicación 24 en el que el circuito digital programable (FPGA) está configurado para contar el número de apariciones de malas descargas y para usar este número como información de proceso, información de diagnóstico y/o alerta temprana.
- 50 26. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 25 que está montado en una máquina en las inmediaciones directas de dicho electrodo y conectado a dicha pieza de trabajo por conductores de baja inductancia parásita y elevada capacitancia parásita.
- 55 27. El generador según cualquiera de las reivindicaciones 22 a 26 en el que el transformador de aislamiento (27) incluye un núcleo plano de ferrita y devanados planos para generar dichas dos polaridades de dicha tensión de descarga.



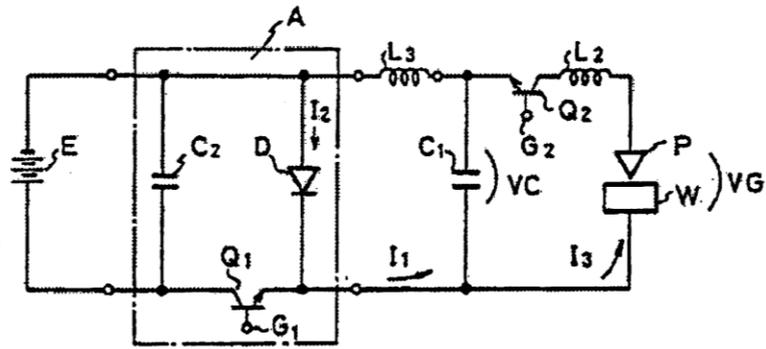


Fig 3 Técnica anterior

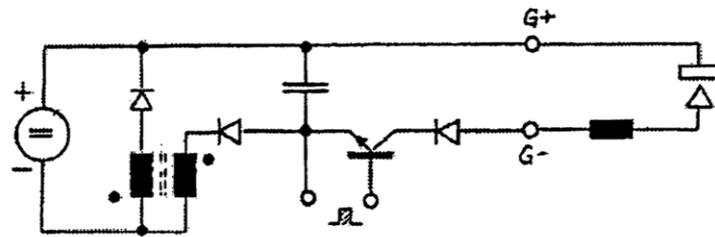


Fig 4 Técnica anterior

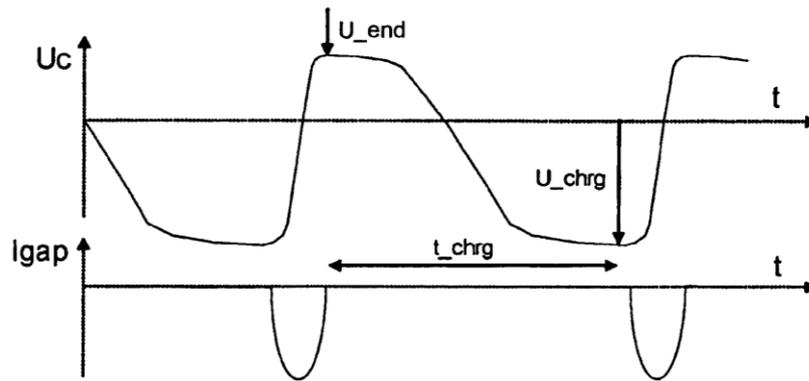


Fig 5 Técnica anterior

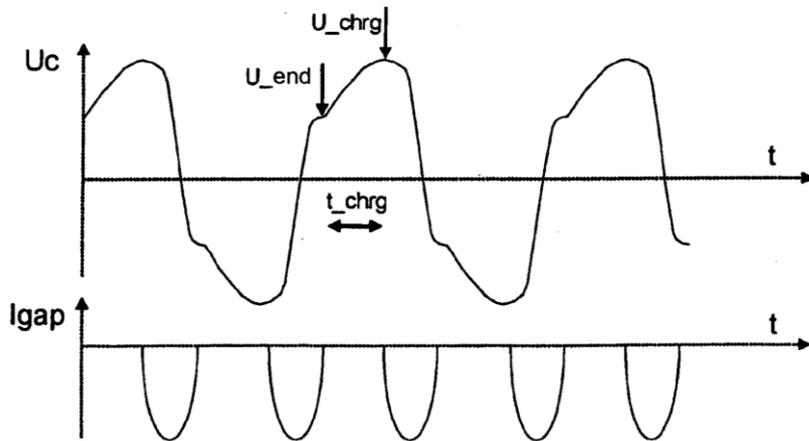


Fig 6

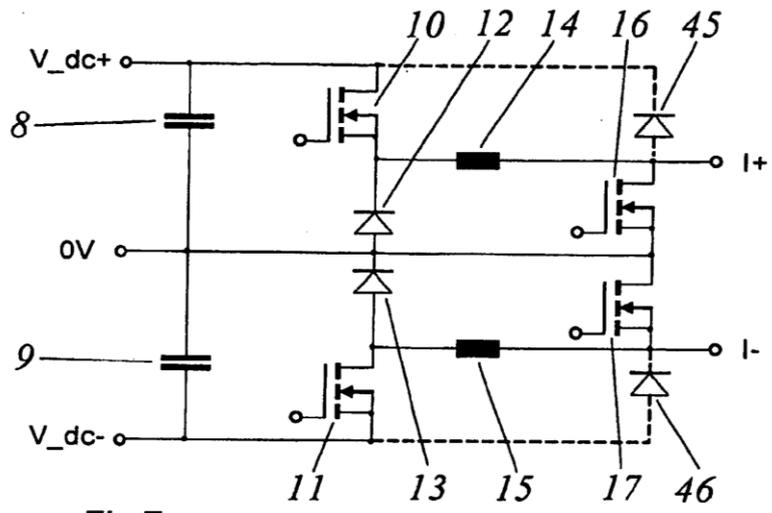


Fig 7

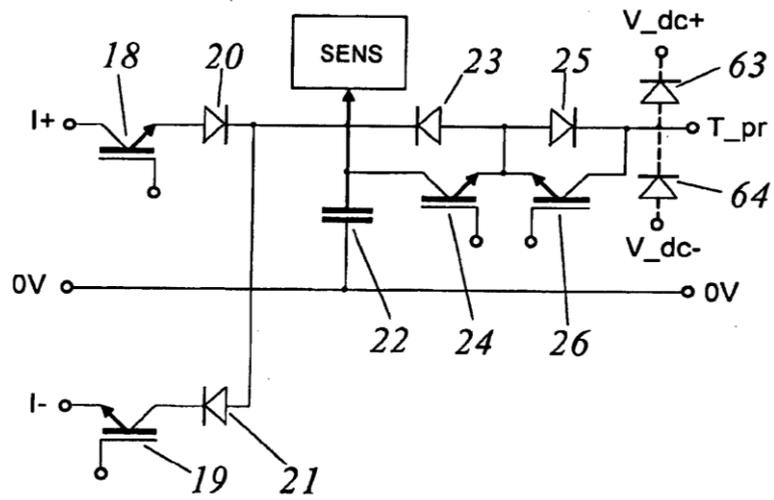
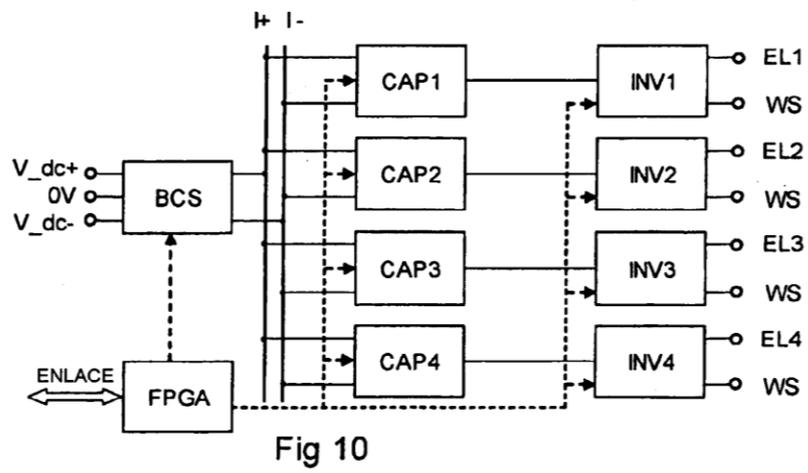
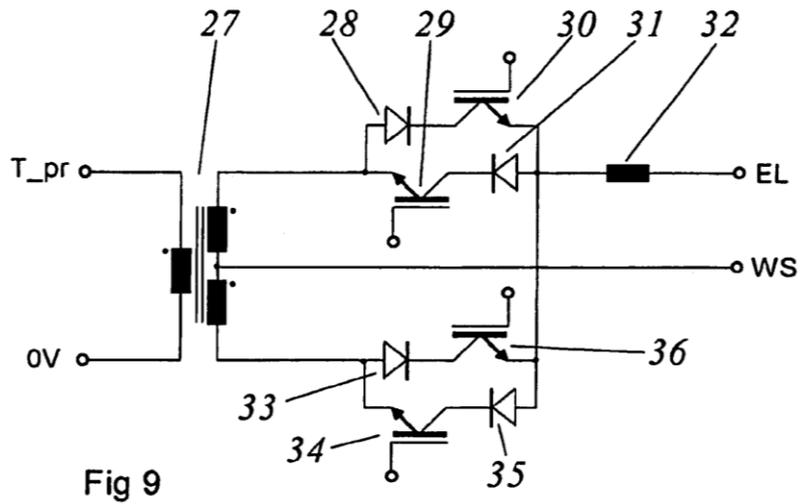


Fig 8



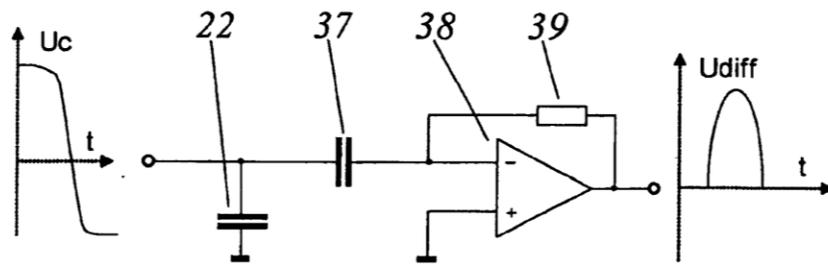


Fig 11

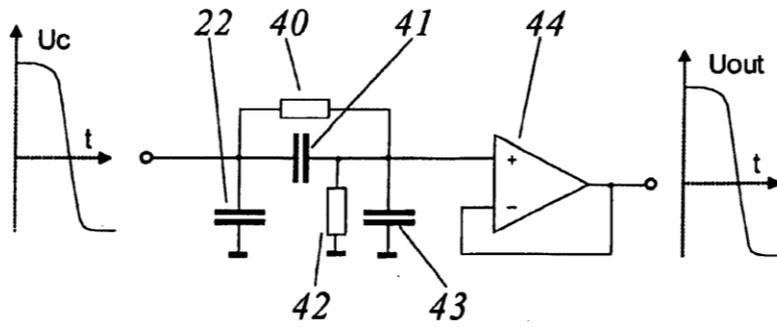


Fig 12

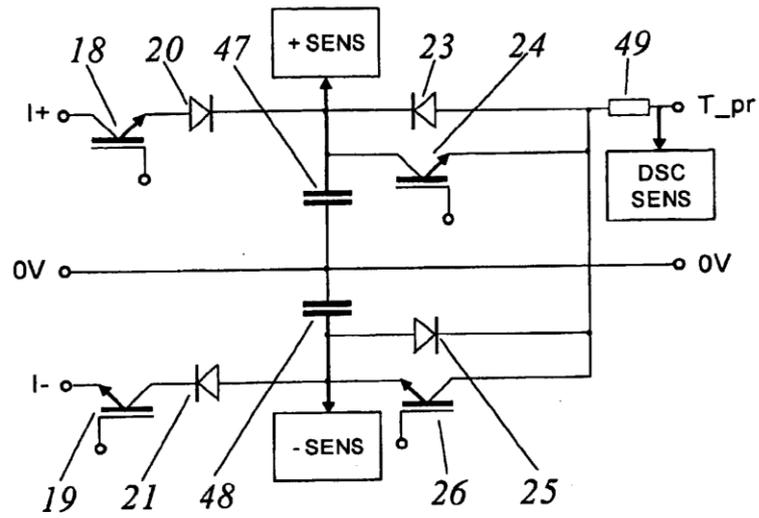


Fig 13

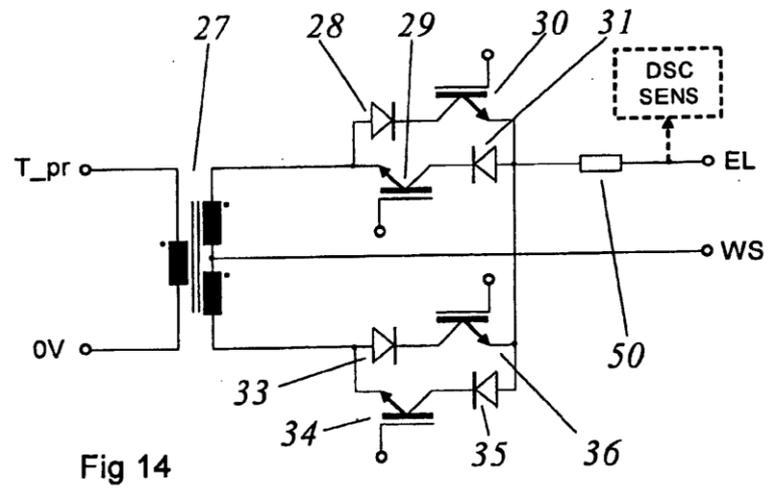
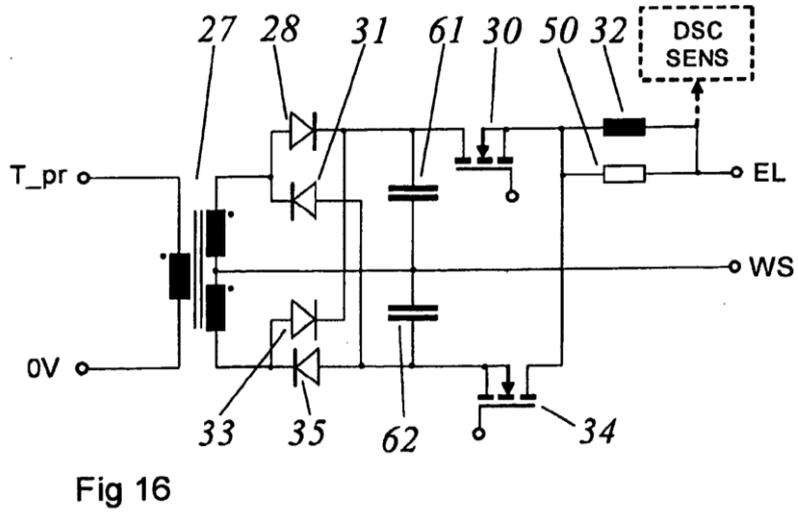
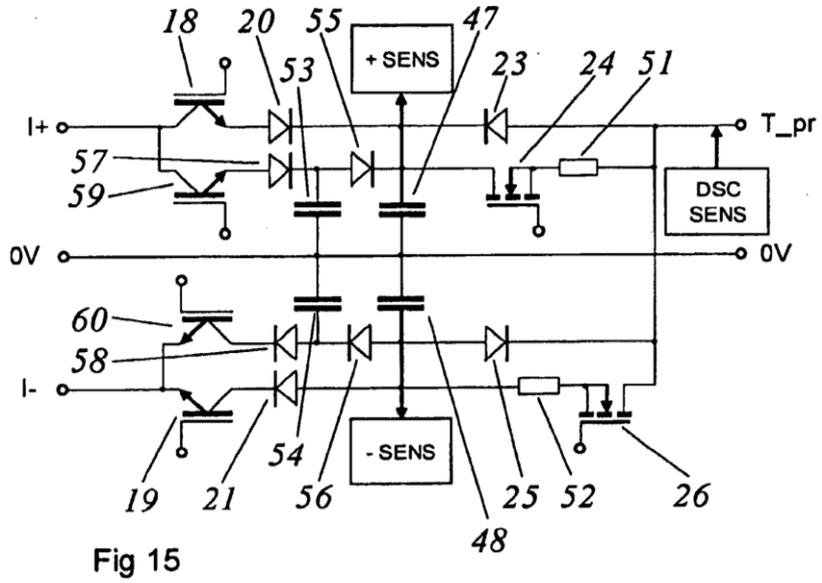


Fig 14



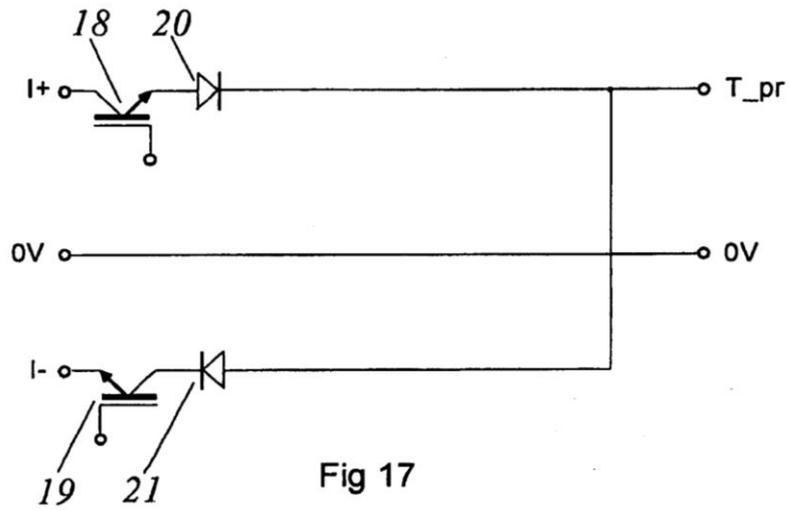


Fig 17

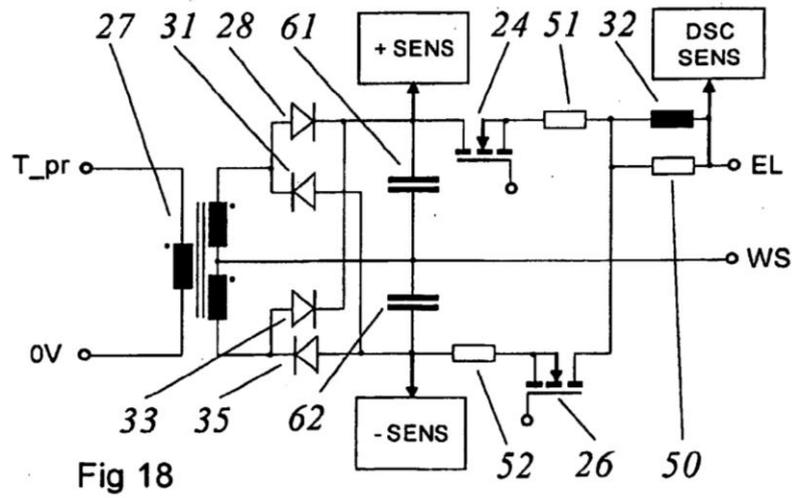


Fig 18

Fig 19a

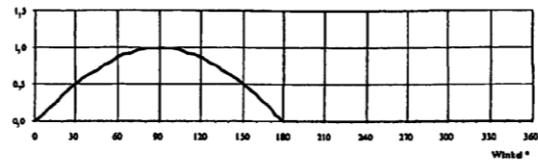


Fig 19b

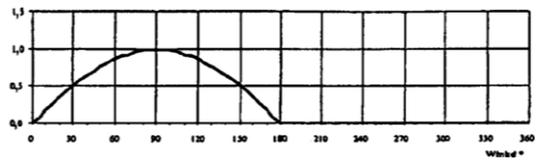


Fig 19c

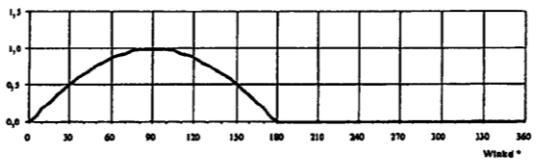


Fig 19d

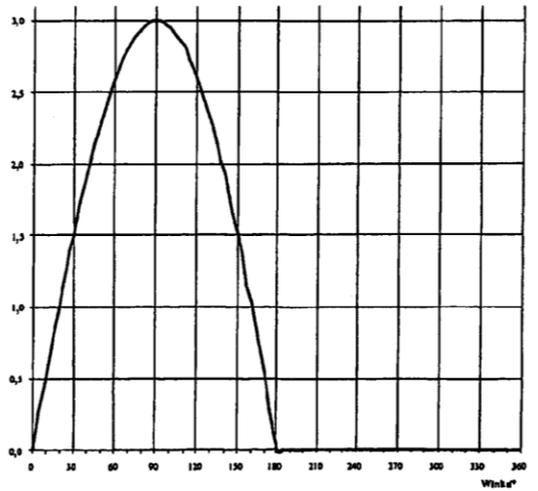


Fig 20a

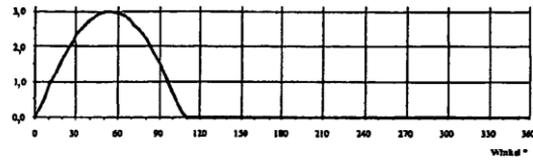


Fig 20b

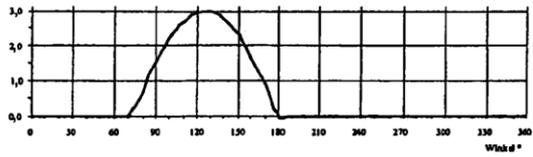


Fig 20c

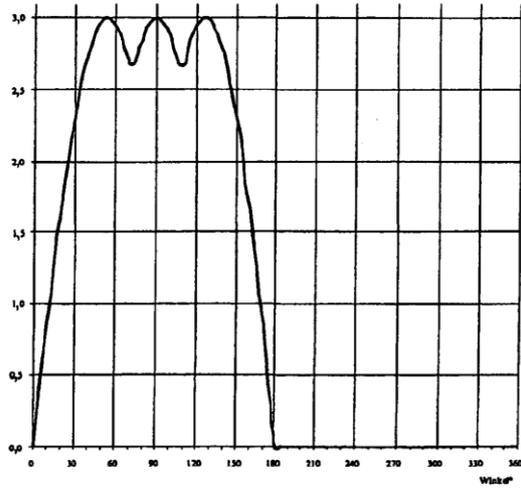


Fig 21a

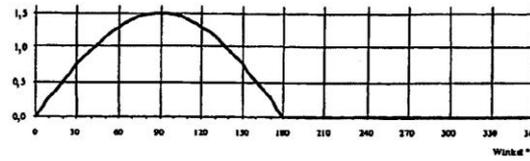


Fig 21b

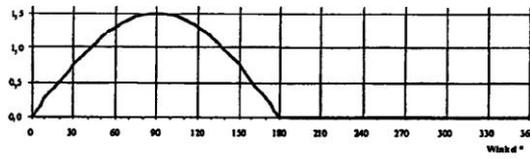


Fig 21c

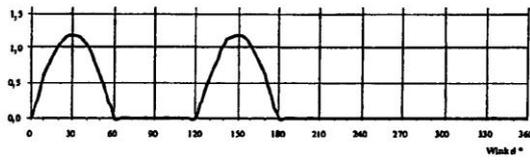


Fig 21d

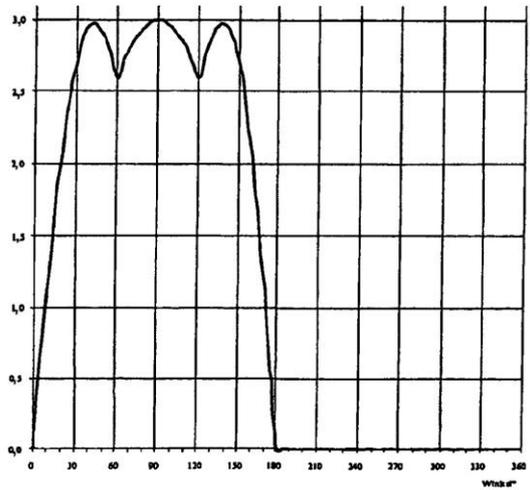


Fig 22a

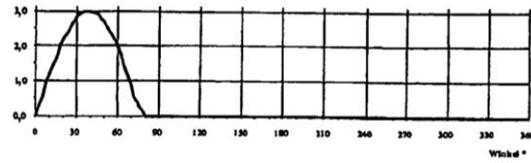


Fig 22b

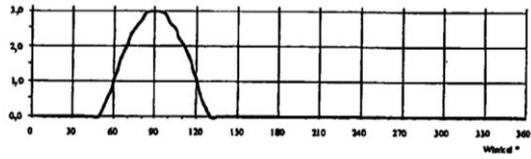


Fig 22c

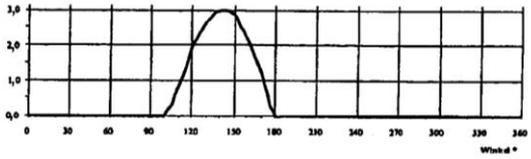
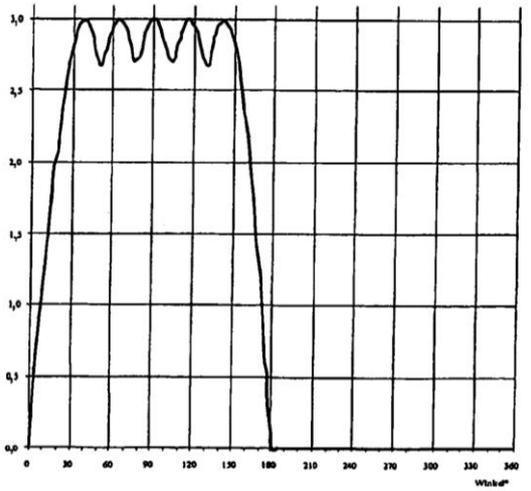
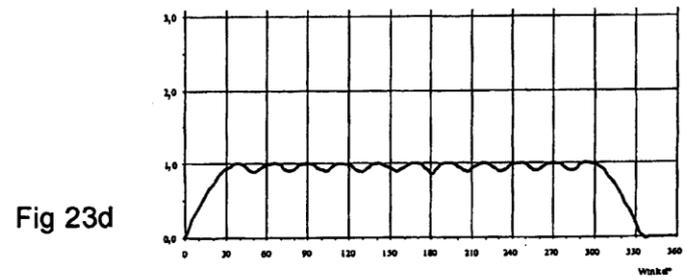
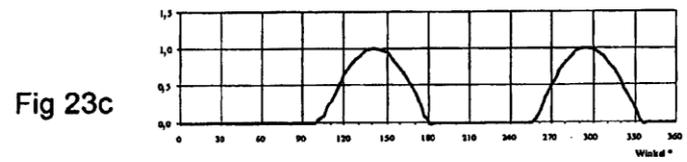
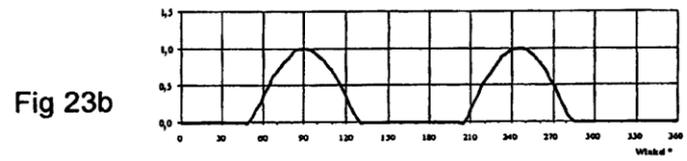
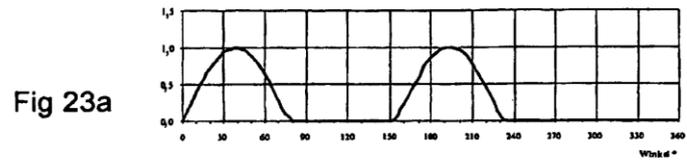
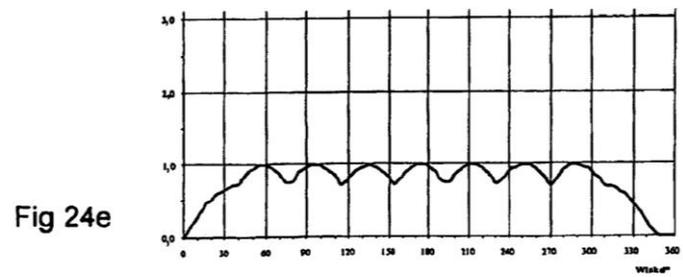
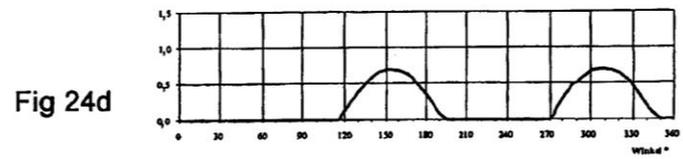
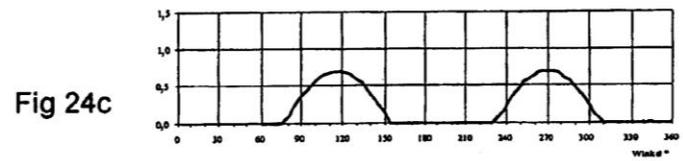
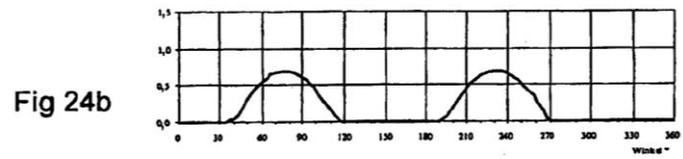
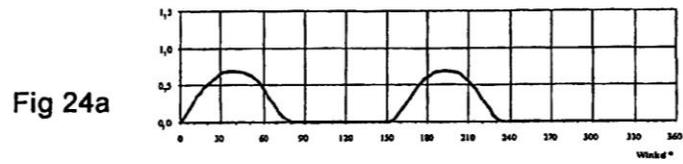


Fig 22d







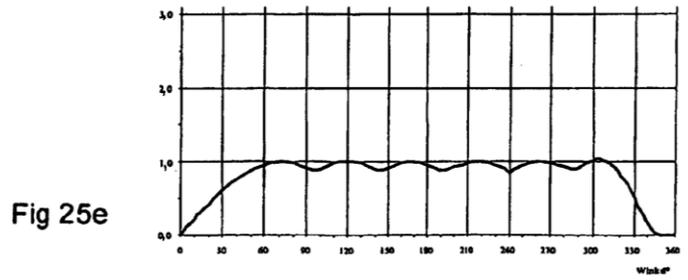
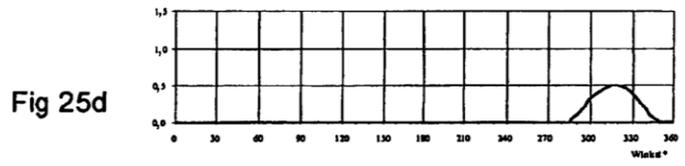
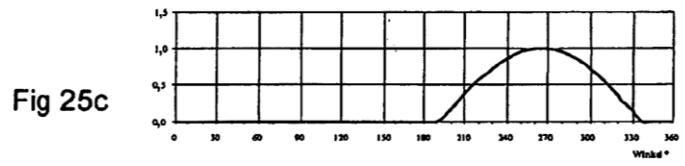
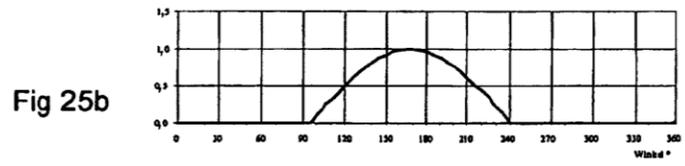
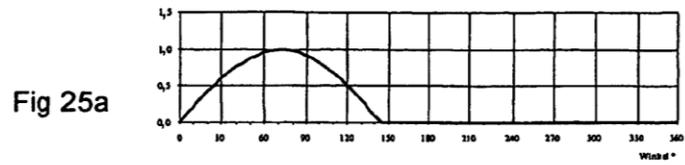


Fig 26a

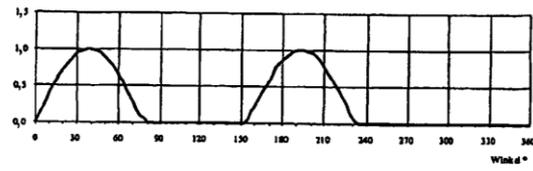


Fig 26b

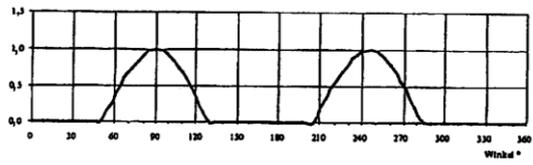


Fig 26c

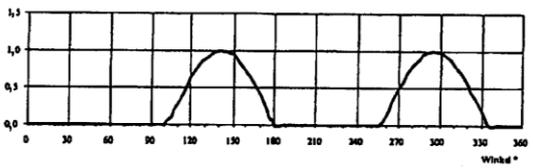


Fig 26d

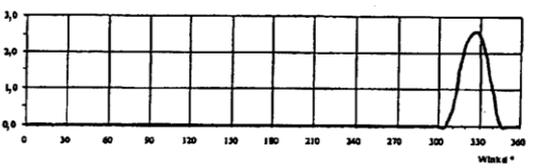


Fig 26e

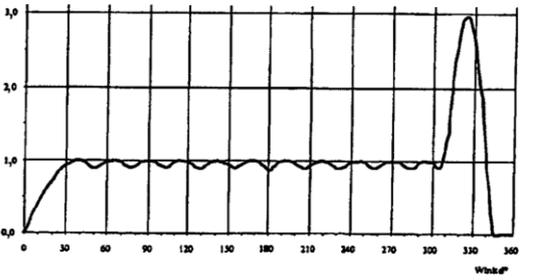


Fig 27a

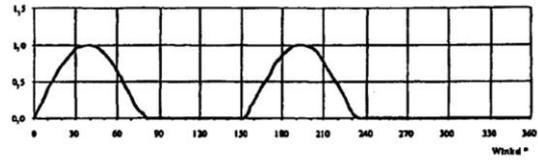


Fig 27b

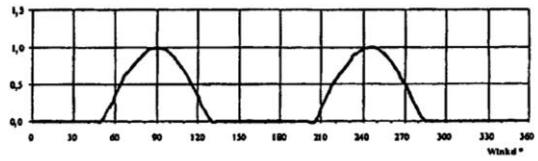


Fig 27c

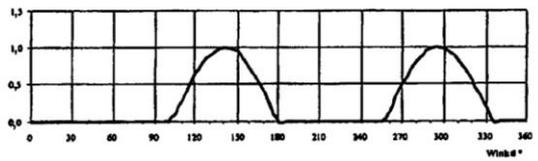


Fig 27d

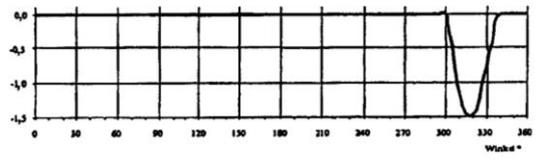


Fig 27e

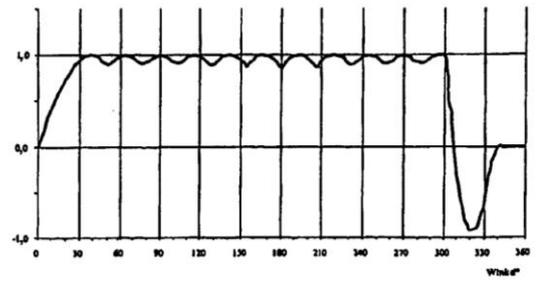


Fig 28a

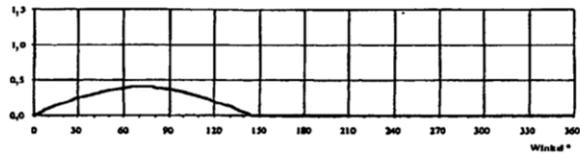


Fig 28b

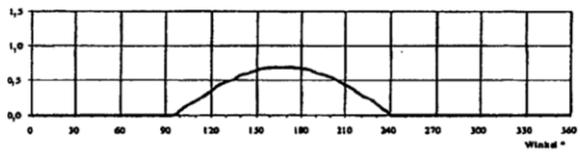


Fig 28c

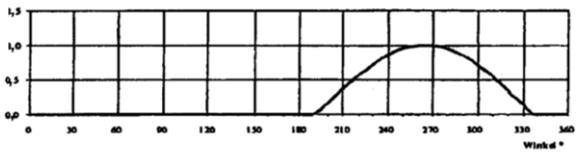


Fig 28d

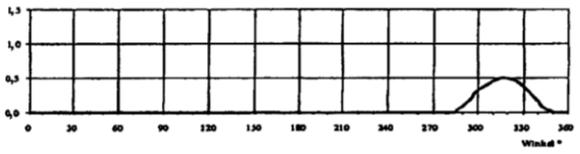


Fig 28e

