(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 533 056**

(51) Int. CI.:

G21C 7/08 (2006.01)
G21C 7/22 (2006.01)
G21D 3/10 (2006.01)
G21D 3/16 (2006.01)
G21D 3/00 (2006.01)
G06F 17/10 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.03.2012 E 12714791 (6)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.12.2014 EP 2686851**

(54) Título: **Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear de agua a presión durante un seguimiento de carga**

(30) Prioridad:

15.03.2011 FR 1152101

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
07.04.2015

(73) Titular/es:

AREVA NP (100.0%)
Tour Areva 1 Place Jean Millier
92400 Courbevoie, FR

(72) Inventor/es:

GROSSETETE, ALAIN

(74) Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

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 de gobierno de un reactor nuclear de agua a presión durante un seguimiento de carga

La presente invención concierne a un procedimiento de gobierno de un reactor nuclear de agua a presión durante un seguimiento de carga.

La figura 1 ilustra esquemáticamente un reactor nuclear 1 de agua a presión de este tipo que, de modo clásico, comprende:

- un núcleo 2 dividido en una zona superior y una zona inferior y que produce una potencia,

- generadores de vapor 3, estando representado un solo generador,

- una turbina 4 acoplada a un generador 5 de energía eléctrica, y

- un condensador 6.

El reactor 1 comprende igualmente un circuito primario 8 equipado con bombas 9, estando representada una sola bomba, y por el cual circula agua a presión según la trayectoria materializada por las flechas. Esta agua asciende especialmente hacia el núcleo 2 para ser recalentada en éste, asegurando la refrigeración del núcleo 2. El agua asegura una función de moderación, es decir de ralentización de los neutrones producidos por el combustible nuclear.

El circuito primario 8 comprende además un presurizador 10 que permite regular la presión del agua que circula por el circuito primario 8.

El agua del circuito primario 8 alimenta igualmente a los generadores de vapor 3 donde ésta es enfriada asegurando la vaporización de agua que circula por el circuito secundario 12.

El vapor producido por los generadores 3 es canalizado por el circuito secundario 12 hacia la turbina 4 y después hacia el condensador 6 en el que este vapor se condensa por intercambio de calor indirecto con agua de refrigeración que circula por el condensador 6.

El circuito secundario 12 comprende aguas abajo del condensador 6 una bomba 13 y un calentador 14.

El núcleo 2 comprende ensamblajes combustibles 16 que están cargados en el interior de una cuba 18. En la figura 1 está representado un solo ensamblaje 16, pero el núcleo comprende una pluralidad de ensamblajes 16.

Los ensamblajes combustibles 16 comprenden lápices de combustible nuclear formados, de manera clásica, por un conducto de aleación, a base de circonio, que contiene un apilamiento de pastillas de combustible nuclear a base de óxido de uranio o de una mezcla de óxido de uranio y de óxido de plutonio.

El reactor 2 comprende barras de control 20, denominadas igualmente racimos de control, de la reactividad del núcleo que están dispuestas en el interior de la cuba 18, por encima de ciertos ensamblajes 16, y que son susceptibles de ocupar en el interior del núcleo una pluralidad de posiciones de inserción. En la figura 1 está representada una sola barra 20, pero el núcleo 2 comprende varias decenas de grupos de barras de control 20. Las barras de control 20 pueden ser desplazadas verticalmente por mecanismos 22 para insertarse, en diferentes posiciones de inserción, en los ensamblajes combustibles 16 que están debajo de las mismas.

De modo clásico, cada barra de control 20 comprende una pluralidad de lápices de control de material absorbente de los neutrones.

Así, el desplazamiento vertical, o estado de hundimiento, de cada barra 20 en el interior de los ensamblajes combustibles 16 permite regular la reactividad del núcleo del reactor 1, permitiendo así variaciones de la potencia global facilitada por el núcleo 2 desde la potencia nula hasta la potencia nominal (indicada en lo que sigue por PN).

Puede considerarse útil, en efecto, especialmente en países como Francia donde el 80% de la electricidad es producida por reactores nucleares, que la potencia global facilitada por los reactores varíe a fin de adaptarse a las necesidades de la red eléctrica a la que estos alimentan; se habla entonces de seguimiento de red o de seguimiento de carga.

Durante un seguimiento de carga, la potencia producida por el reactor es regulada de modo que corresponda a un programa preestablecido por el servicio de explotación de la red eléctrica.

El ajuste de la potencia facilitada por el reactor es realizado por medios de gobierno situando en el interior del núcleo las barras de control constituidas de elemento neutrófago en diferentes posiciones de inserción de modo que absorban más o menos los neutrones y/o ajustando eventualmente la concentración de un compuesto absorbente

neutrónico, tal como el boro, en el fluido caloportador primario, en función de la potencia deseada y/o de las mediciones obtenidas por la instrumentación del núcleo del reactor.

Por ejemplo, los medios de gobierno están formados por un conjunto de equipos electrónicos y eléctricos que a partir de mediciones proporcionadas por cadenas de instrumentación y que las comparan con umbrales, elaboran órdenes de desplazamiento de barras de control 20 y/o de modificación de la concentración de boro en el fluido caloportador primario por inyección de agua (dilución) o de boro (boración).

Se conocen diferentes modos de gobierno de un reactor nuclear de agua a presión. De manera general, el gobierno consiste en controlar y en regular como mínimo la temperatura media del fluido caloportador primario T_{med} y la distribución de potencia (térmica y neutrónica) y en particular la distribución axial de potencia DA a fin de evitar la formación de un desequilibrio de potencia entre la zona alta y la zona baja del núcleo.

Los métodos de regulación de estos parámetros varían en función de los diferentes modos de gobierno utilizados. De manera general, la temperatura media T_{med} es regulada por el desplazamiento de las barras de control 20 en función de los diferentes parámetros tales como la potencia demandada a la turbina, el valor corriente de la temperatura del fluido caloportador, y/o eventualmente por la modificación de la concentración de boro en el fluido caloportador primario, lo que permite indirectamente adaptar las posiciones de las barras de control 20 a una posición deseada, especialmente a fin obtener una distribución axial de potencia DA deseada y/o una capacidad de subida rápida de la potencia del núcleo a la potencia deseada.

La elección del modo de gobierno de un reactor nuclear es determinada teniendo en cuenta el hecho de que la acción de las barras de control tiene efectos inmediatos mientras que la acción por inyección de boro es comparativamente más lenta.

Además, el aumento de la concentración de boro en solución en el fluido caloportador primario requiere medios de almacenamiento y de inyección de ácido bórico y por tanto impone limitaciones suplementarias de diseño.

Así pues, se tiende a utilizar la inyección de boro o de agua en solución solamente para corregir los efectos a largo plazo sobre la reactividad del funcionamiento del reactor, es decir esencialmente el efecto xenón y el envejecimiento del combustible.

De esta manera, a fin de responder a las necesidades de la red eléctrica, el gobierno del reactor es efectuado preferentemente por el desplazamiento de las barras de control.

Sin embargo, la inserción de las barras de control afecta, de modo perjudicial, a la distribución axial de potencia producida en el reactor. Puede resultar así la formación de picos de potencia en el núcleo así como el desarrollo de oscilaciones de la concentración de xenón a más largo plazo, propicias para la acentuación de estos picos de potencia, factores que intervienen de modo restrictivo en el procedimiento de gobierno e imponen un recurso corrector modificando la concentración de boro en el fluido de refrigeración primario.

Ahora bien, en seguimiento de carga, es decir con un nivel de producción de potencia que se adapte a una curva diaria, e incluso en modo controlado, por telerregulación, las variaciones de producción de potencia multiplican las acciones de gobierno con las nefastas consecuencias anteriormente mencionadas, solicitando de manera importante a los mecanismos de las barras de control y provocando importantes volúmenes de efluentes debido a las operaciones repetidas de dilución y de boración del fluido caloportador.

A fin de responder a estas dificultades, se han desarrollado métodos de gobierno de un reactor de agua a presión que determinan los posicionamientos de las barras de control en el interior del núcleo, que permiten limitar las perturbaciones de la distribución axial de potencias y el recurso a la utilización del boro, cuya concentración es ajustada de manera que se compensen principalmente los efectos del desprendimiento de xenón y del envejecimiento de los lápices combustibles.

Sin embargo, este método de gobierno no está siempre optimizado y no siempre permite minimizar los volúmenes de efluentes así como el desplazamiento de los grupos de barras de control. Además, la minimización de los volúmenes de efluentes así como de la solicitación de los mecanismos de inserción de las barras de control sigue siendo una preocupación permanente del propietario.

Un procedimiento de gobierno de un reactor nuclear de agua a presión durante un seguimiento de carga es conocido por el documento EP 0 083 776 A2.

En este contexto, la invención está destinada a resolver los problemas anteriormente mencionados, permitiendo optimizar la posición de consigna de los racimos de control en el interior del núcleo del reactor, minimizar los desplazamientos de estos racimos y de esta manera minimizar eventualmente los volúmenes de efluentes provocados por las operaciones de dilución/boración del fluido caloportador primario durante las variaciones de potencia del reactor.

A tal fin, la invención propone un procedimiento de gobierno de un reactor nuclear de agua a presión, comprendiendo el citado reactor:

- un núcleo que produce una potencia;
- una pluralidad de grupos de barras de control de la reactividad del citado núcleo susceptibles de ocupar en el interior del núcleo una pluralidad de posiciones de inserción escalonadas verticalmente a partir de una posición alta;
- medios para adquirir magnitudes representativas de las condiciones de funcionamiento del núcleo;

comprendiendo el citado procedimiento las etapas consistentes en:

- medir la potencia efectiva del reactor nuclear;
- adquirir un valor de consigna de la potencia objetivo deseada del reactor nuclear;

estando caracterizado el citado procedimiento por que éste comprende además las etapas consistentes en:

- adquirir una duración estimada de aumento de potencia para llegar al citado valor de consigna de la potencia objetivo deseada, correspondiendo la citada duración estimada a la duración de aumento de potencia para pasar de la citada potencia efectiva al citado valor de consigna de la potencia objetivo;
- determinar la posición de consigna de al menos un grupo de barras de control entre la citada pluralidad de barras de control para alcanzar el citado valor de consigna de la citada potencia objetivo deseada en función de la citada duración estimada, de la potencia efectiva medida y del citado valor de consigna de la citada potencia objetivo;
- controlar la posición del citado al menos un grupo de barras de control con el fin de colocarle en la posición de consigna (Z).

Gracias a la invención, es posible optimizar la posición de consigna de las barras de control durante un seguimiento de carga teniendo en cuenta la evolución del efecto xenón, elemento neutrófago, que interviene durante este seguimiento de carga. La posición de consigna optimizada se determina teniendo en cuenta un parámetro de tiempo representativo de la estimación de la duración de aumento de potencia para alcanzar el valor de consigna de la potencia objetivo deseada.

A título de ejemplo, la posición de consigna retenida podrá ser la que dé el mejor comportamiento del núcleo durante la subida de potencia, es decir la posición que permita a las barras de control encontrarse en la posición óptima cuando se alcance la potencia objetivo. Por ejemplo, la posición óptima de barras de control a la potencia nominal del 100% puede ser la posición normal de las barras de control en funcionamiento estabilizado al 100% (es decir, la posición nominal de las barras de control).

Gracias al procedimiento de acuerdo con la invención, es posible igualmente minimizar los volúmenes de efluentes en el núcleo del reactor por una gestión adaptada de las operaciones de dilución y de boración al tiempo que se preservan los mecanismos de desplazamiento de las barras de control por la reducción del número de pasos de las barras de control, limitándose los desplazamientos de la barras de control únicamente a los desplazamientos necesarios para la variación de potencia en la duración deseada.

De acuerdo con otra característica, el procedimiento comprende una etapa consistente en adquirir un instante estimado de inicio de citado aumento de potencia, correspondiendo el citado instante estimado al final del escalón de la citada potencia efectiva y siendo tenido en cuenta en la etapa de determinación de la posición de consigna de al menos un grupo de barras de control.

De acuerdo con otra característica, la etapa de control es realizada de modo que el citado al menos un grupo de barras de control quede situado en su posición de consigna, como muy tarde al inicio del citado aumento de potencia.

De acuerdo con otra característica, el procedimiento comprende una etapa de regulación de la concentración de un elemento neutrófago tal como el boro en el fluido caloportador en función de la citada posición de consigna de al menos un grupo de barras de control entre la citada pluralidad de barras de control. Se entiende por regulación una o varias operaciones de disminución o de aumento de la concentración del citado elemento neutrófago tal como el boro (es decir, dilución o boración) en el fluido caloportador primario del reactor nuclear.

De acuerdo con otra característica, la citada etapa de determinación de la citada posición de consigna del citado al menos un grupo de barras de control es realizada a través de medios de software que ponen en práctica un código neutrónico. Se entiende por código neutrónico un código que resuelva periódicamente la ecuación de la difusión y que actualice el balance isotrópico del núcleo en el transcurso del agotamiento del combustible.

De acuerdo con otra característica, la citada etapa de determinación de la citada posición de consigna del citado al menos un grupo de barras de control comprende:

- una subetapa de determinación de una primera posición de al menos un grupo de barras de control en función de la citada potencia efectiva medida y del citado valor de consigna de la potencia objetivo;
- una subetapa de determinación de la variación de la concentración de xenón en el interior del citado núcleo del citado reactor durante el futuro aumento de potencia, siendo la citada variación de concentración de xenón función de la citada duración estimada, y/o de la citada potencia efectiva medida y/o del citado valor de consigna de la potencia objetivo;
- una subetapa de determinación de un factor corrector de la posición de al menos un grupo de barras de control función de la citada variación de la concentración de xenón.

De acuerdo con otra característica, la citada etapa de determinación de la citada posición de consigna del citado al menos un grupo de barras de control comprende

- una subetapa de determinación de una primera posición de al menos un grupo de barras de control en función de la citada potencia efectiva medida y del citado valor de consigna de la potencia objetivo;
- una subetapa de determinación de la variación de la concentración de xenón en el interior del citado núcleo del citado reactor durante el futuro aumento de potencia, siendo la citada variación de concentración de xenón función de la citada duración estimada, y/o de la citada potencia efectiva medida y/o del citado valor de consigna de la potencia objetivo, y/o del citado instante estimado de inicio del aumento de potencia;
- una subetapa de determinación de un factor corrector de la posición de al menos un grupo de barras de control función de la citada variación de la concentración de xenón.

Otras características y ventajas de la invención se pondrán de manifiesto de modo más claro en la descripción que de la misma se da a continuación, a título indicativo y en modo alguno limitativo, refiriéndose a las figuras anejas, en las cuales:

- la figura 1 ilustra esquemáticamente un reactor de agua a presión;
- la figura 2 es una representación esquemática que ilustra las diferentes etapas del procedimiento de acuerdo con la invención;
- la figura 3 ilustra un segundo modo de realización de la etapa de determinación de la posición de consigna Z del procedimiento de acuerdo con la invención ilustrado en la figura 2;
- la figura 4A representa de manera esquemática la evolución de la potencia durante un seguimiento de carga así como la evolución de la concentración de xenón durante ese mismo seguimiento de carga;
- la figura 4B representa de manera esquemática la evolución de las posiciones de las barras de control así como la evolución del inicio de dilución y de boración del fluido caloportador primario durante el seguimiento de carga representado en la figura 4A con un procedimiento de gobierno de acuerdo con la técnica anterior;
- la figura 4C representa de manera esquemática una comparación de las evoluciones de las posiciones de las barras de control así como de las evoluciones del inicio de dilución y de boración del fluido caloportador primario durante el seguimiento de carga representado en la figura 4A entre el procedimiento de gobierno ilustrado en la figura 4B y el procedimiento de gobierno de acuerdo con la invención.

La figura 1 ha sido descrita ya anteriormente refiriéndose a la presentación general de la invención.

La figura 2 ilustra esquemáticamente las etapas principales del procedimiento de optimización de acuerdo con la invención destinado a gobernar un reactor nuclear y especialmente un reactor de agua a presión.

Un reactor de agua a presión está representado de manera simbólica por la referencia 100, en la figura 2 y, como se indicó anteriormente en la figura 1, comprende:

- un núcleo 30 que comprende ensamblajes de combustibles nucleares;
- una cuba 32 que comprende el núcleo 30 del reactor;
- generadores de vapor (no representados) aptos para arrastrar a un alternador acoplado a la red de distribución eléctrica;
- un circuito primario 31 que une en circuito cerrado la cuba 32 con un lado primario del generador de vapor;

- un circuito secundario (no representado) que une en circuito cerrado un lado secundario de los generadores de vapor a una turbina.

El circuito primario 31 es apto para asegurar la circulación a través del núcleo 30 de un fluido caloportador primario a presión, según la trayectoria materializada por las flechas. El fluido caloportador primario está formado esencialmente de agua y de boro disuelto. El fluido caloportador asciende hacia el núcleo 30 calentándose en contacto con los ensamblajes combustibles asegurando así la refrigeración del núcleo 30. El fluido caloportador primario alimenta igualmente a los generadores de vapor donde éste es enfriado cediendo su calor. El circuito secundario es apto para asegurar la circulación de un fluido de refrigeración secundario, que comprende esencialmente agua, siendo vaporizado este líquido en los generadores de vapor por el calor cedido por el fluido primario. El vapor producido por los generadores es canalizado hacia la turbina a la que éste arrastra, y después hacia un condensador en el cual el vapor es condensado por intercambio de calor indirecto con el agua de refrigeración que circula por el condensador. El vapor condensado es enviado después hacia los generadores de vapor.

El alternador acoplado a la turbina facilita a la red eléctrica una potencia eléctrica variable en función de la demanda de la red. El reactor 100 es asi gobernado de manera que la potencia facilitada por el núcleo se adapte permanentemente a la potencia eléctrica demandada por la red, haciendo variar la reactividad del núcleo.

Con este objetivo, el reactor 100 comprende además:

- medios para ajustar la concentración de boro (no representados) disuelto en el fluido caloportador primario, por inyección de una solución de ácido bórico concentrada en el líquido primario para hacer variar la concentración de boro al alza, o por inyección de agua pura para hacer variar la concentración de boro a la baja;

- barras de control 40 de la reactividad del núcleo 30, siendo cada una de las barras 40 susceptible de ocupar en el interior del núcleo 30 una pluralidad de posiciones de inserción escalonadas verticalmente a partir de una posición alta;

- medios para insertar selectivamente cada grupo de barras de control en el núcleo 30, de arriba abajo, hasta una de las posiciones de inserción determinadas por el procedimiento;

- medios para adquirir magnitudes representativas del funcionamiento del reactor, tales como: el flujo neutrónico, la temperatura del líquido primario en el ramal frío TBF del circuito primario, la temperatura del líquido primario en el ramal caliente TBC del circuito primario, la posición de los racimos de control 40;

- medios de medición de la potencia efectiva Pe del núcleo a partir de las magnitudes representativas del funcionamiento del reactor;

- medios de adquisición de consignas de gobierno fijadas por un operador por medio de una interfaz hombre/máquina (no representada).

El procedimiento de gobierno de acuerdo con la invención representado en la figura 2 permite minimizar los desplazamientos de las barras de control 40 durante un seguimiento de carga por la determinación de una posición de consigna Z de las barras de control 40 teniendo en cuenta la variación del efecto xenón durante la restitución de carga, determinando el procedimiento la posición de las barras de control 40 en función de la duración estimada del aumento de potencia de la restitución.

El procedimiento de acuerdo con la invención comprende una primera etapa de adquisición de la potencia efectiva Pe, ilustrada por el bloque 81.

Durante las etapas ilustradas respectivamente por los bloques 82 y 83, los medios de adquisición adquieren un valor de consigna de la potencia objetivo Pc, que se desea alcanzar, así como una duración DURACIÖN correspondiente al intervalo de tiempo estimado del aumento de potencia del reactor para alcanzar el valor de consigna Pc partiendo del valor efectivo de potencia Pe.

Estos valores de consigna Pc, DURACIÖN son facilitados por el operador durante la programación del seguimiento de carga a través de una interfaz hombre/máquina (no representada).

El procedimiento de gobierno comprende además una etapa de determinación de la posición de consigna Z de las barras de control 40, ilustrada por el bloque 84. La posición Z de las barras de control 40 es determinada en función del valor de la potencia efectiva Pe, del valor de la potencia de consigna Pc, del intervalo de tiempo estimado DURACIÓN del aumento de potencia del reactor para alcanzar el valor de consigna Pc.

De acuerdo con una variante de realización, los medios de adquisición adquieren igualmente un valor complementario correspondiente a un instante estimado de la restitución de carga INST (es decir, el instante de final de la duración del escalón de la potencia efectiva). Así, en esta variante de realización, la determinación de la posición Z de las barras de control 40 será más precisa y función del valor de la potencia efectiva Pe, del valor de la

potencia de consigna Pc, del intervalo de tiempo estimado DURACIÓN del aumento de potencia del reactor para alcanzar el valor de consigna Pc así como del instante estimado de restitución de carga INST.

De acuerdo con un primer modo de realización del procedimiento de acuerdo con la invención, la etapa 84 de determinación de la posición de consigna Z de las barras de control 40 es realizada por medios de software presentes en el reactor nuclear 100 que ponen en práctica un código de cálculo neutrónico que simula el comportamiento del reactor a partir de los datos representativos de las características materiales, geométricas y neutrónicas del núcleo, así como de las condiciones de funcionamiento del núcleo, en continuo, que representan el modelo 3D del núcleo.

A título de ejemplo puede citarse el código de cálculo neutrónico SMART basado en una modelación 3D de tipo nodal avanzado. Los principios del cálculo neutrónico de núcleo están descritos más en detalle en el documento « Méthodes de calcul neutronique de coeur » (Techniques de l'ingénieur – B 3 070 – Giovanni B. Bruna et Bernard Guesdon).

Estos medios de software que ponen en práctica un código de cálculo neutrónico permiten determinar por cálculo iterativo la posición de consigna Z ideal de la barras de control a partir de los datos de entrada, tales como la potencia efectiva Pe, el valor de consigna Pc de la potencia objetivo que se desee alcanzar y la duración estimada DURACIÓN del aumento de potencia, y opcionalmente del instante estimado de restitución de carga INST, facilitados por el operador.

A título de ejemplo, la posición de consigna Z retenida por los medios de software podrá ser la que dé el mejor comportamiento del núcleo durante la subida de potencia, es decir la posición que permita a las barras de control 40 encontrarse en la posición óptima cuando se alcance la potencia objetivo. La posición óptima de barras de control 40 a la potencia nominal del 100% puede ser la posición normal de las barras de control en funcionamiento estabilizado del 100% (es decir, la posición nominal de las barras de control).

La figura 3 ilustra un segundo modo de puesta en práctica de la etapa 84 de determinación de la posición de consigna Z de las barras de control 40. Este segundo modo de puesta en práctica permite simplificar esta etapa de determinación en comparación con el modo de realización precedente y permite liberarse de la utilización de un código de cálculo neutrónico.

De acuerdo con este segundo modo, medios de comparación permiten durante una subetapa, ilustrada por el bloque 44, comparar el desvío ΔP entre la potencia efectiva Pe y el valor de consigna Pc de la potencia objetivo que se desee alcanzar.

Los medios de gobierno comprenden medios de software asociados a medios de almacenamiento que comprenden una tabla de correlación dZ = f(ΔP) que permite definir, durante la etapa ilustrada por el bloque 46, una posición dZ de las barras de control en función del desvío ΔP de la potencia. La posición dZ determinada durante esta etapa corresponde a la posición de inserción de las barras de control en la cual es posible alcanzar el valor de consigna Pc de la potencia sin necesidad de compensación del efecto xénon.

El bloque 45 ilustra una etapa complementaria en la cual lo medios de software estiman una variación del efecto xenón ΔX en función del desvío ΔP de potencia y de la duración estimada DURACIÓN de la variación de potencia facilitada por el operador.

De acuerdo con un modo de realización ventajoso, esta estimación de la variación de xenón ΔX, durante la variación de potencia, es proporcional a la duración DURACIÓN de la variación y a la amplitud de la variación de potencia, y puede expresarse por la relación:

$$\Delta X = A \times (\text{DURACIÓN} \times \Delta P)$$

donde

- ΔX es la variación del efecto xenón expresada en pcm (por cien mil);
- A es un coeficiente de proporcionalidad expresado en pcm/(hora x %PN);
- DURACIÓN es la duración estimada de la variación de potencia expresada en horas;
- ΔP es el desvío de potencia expresado en %PN.

Sin embargo, la estimación de la variación de xenón no está limitada a un modo lineal y puede ser realizada por medio de un modelo de cálculo más complejo que tenga en cuenta la inexactitud de la linealidad de la variación de xenón ΔX con la duración DURACIÓN y el desvío de potencia ΔP.

De acuerdo con una variante de realización, la estimación de la variación de xenón puede igualmente ser función del instante estimado INST de restitución de carga de modo que se estime de modo más preciso la variación de xenón.

Así, la variación de xenón ΔX durante una subida o una bajada de potencia es tanto más importante cuanto mayor es la duración de esta variación (en la medida en que la duración de esta variación sea inferior típicamente a 7 horas). Se considera así que para una variación de potencia en la que el intervalo de tiempo, para alcanzar la potencia de consigna Pc, es superior a una hora, y especialmente para un retorno de potencia, la evolución del xenón en el interior del núcleo del reactor se hace entonces significativa.

Como muestra la curva 61 de concentración de xenón del esquema representado en la figura 4A, el efecto xenón aparece desde el inicio de una bajada de carga y continúa variando durante el escalón bajo de potencia.

Esta variación del efecto xenón ΔX estimada, durante el intervalo de tiempo DURACIÓN asignado a la variación de potencia, permite así compensar la posición dZ determinada en función del desvío ΔP de potencia, por la adición de un factor corrector dZc determinado, durante la etapa ilustrada por el bloque 48, por la relación:

$$dZ_c = f(\Delta X)$$

donde f es una función creciente.

La consigna de posición Z de las barras de control es determinada entonces por la combinación de la posición dZ y del factor corrector dZc durante la etapa ilustrada por el bloque 47.

Así, en este segundo modo de realización, no es necesario disponer de medios de software que pongan en práctica un código neutrónico de tipo SMART para determinar una posición de consigna Z optimizada que permita minimizar los movimientos de los racimos de mando.

Una vez determinada la posición de consigna Z de las barras de control, el control y la regulación de las posiciones de las barras de control en sus posiciones de consigna Z son realizados de modo clásico por los modos de gobierno conocidos, compensando eventualmente los movimientos de las barras por otro medio de control de la reactividad, como por ejemplo la modificación de la concentración de un compuesto absorbente neutrónico, tal como el boro, en el fluido caloportador primario por operaciones de dilución/boración.

De acuerdo con el modo de gobierno utilizado, se utilizarán inyecciones de boro o de agua y/o la utilización de otros grupos de barras de control más o menos absorbentes neutrónicos que se posicionarán de modo estratégico en el interior del núcleo.

Por ejemplo, cuando esto sea posible, se privilegiará el retorno de los grupos de barras de control a su posición de consigna aprovechando las variaciones de la concentración de xenón más bien que por operaciones de dilución/boración. A título de ejemplo, si la posición de consigna corresponde a una posición más extraída que la posición a la cual llegan los grupos como consecuencia de la bajada de carga, se dejará que los grupos se extraigan compensando el aumento de la concentración de xenón, y después se comenzará la operación de dilución solamente cuando los grupos hayan alcanzado una posición de consigna.

Los esquemas representados en las figuras 4B y 4C ilustran la optimización del gobierno de un reactor nuclear de agua a presión en seguimiento de carga en comparación con un procedimiento de gobierno que no tenga en cuenta el efecto xenón en la determinación de la posición Z de las barras de control.

La figura 4B ilustra de modo más particular la evolución de las posiciones de las barras de control (curvas 60) así como la evolución del caudal de dilución y de boración del fluido caloportador primario, de acuerdo con un procedimiento de la técnica anterior, durante un ejemplo de seguimiento de carga representado en la figura 4A.

Las zonas rayadas 62 y 63 representan respectivamente el volumen de agua de la dilución y el volumen de boro de la boración utilizados durante el seguimiento de carga de la figura 4A.

La figura 4C representa la evolución de las posiciones de las barras de control (curva 50) así como la evolución del caudal de dilución y de boración del fluido caloportador primario, con el procedimiento de gobierno de acuerdo con la invención, durante el seguimiento de carga ilustrado en la figura 4A.

La figura 4C ilustra igualmente la evolución de las posiciones de las barras de control (curvas 60) así como la evolución del caudal de dilución y de boración del fluido caloportador primario ilustrado en la figura 4B, a título de comparación.

Las zonas rayadas 52, 53a y 53b representan respectivamente el volumen de agua de la dilución y el volumen de boro de la boración utilizados durante el seguimiento de carga de la figura 4A.

El seguimiento de carga, ilustrado a título de ejemplo en la figura 4A, es un seguimiento de carga en el cual se efectúa una bajada de carga (zona B) a partir de un escalón alto del 100% de la potencia nominal PN (zona A) hasta un escalón bajo (zona C) equivalente al 50% de PN, durante un período relativamente largo, del orden de diez horas, antes de la restitución de carga (zona D) hasta el retorno a la potencia nominal representado en la zona E.

Las variaciones de potencia, bajada de potencia y subida de potencia, son relativamente largas, del orden de dos horas, con una velocidad de progresión del orden del 0,5% de la potencia nominal por minuto. Típicamente, las variaciones de potencia tienen una velocidad de progresión inferior o igual al 1% de la potencia nominal por minuto.

En la figura 4C, el perfil 50 de trazo grueso completo esquematiza un ejemplo de evolución de la posición Z de las barras de control que se encuentran en el interior de la cuba del reactor nuclear, determinada por el procedimiento de acuerdo con la invención. En comparación, el perfil 60 en trazo completo en la figura 4B, e igualmente representado en línea de puntos en la figura 4C, esquematiza la evolución de la posición Z de las barras de control determinada por un modo de gobierno de acuerdo con la técnica anterior que no tiene en cuenta la variación del efecto xenón durante el seguimiento de carga.

Así, el aumento del efecto xenón (elemento neutrófago) que interviene desde la bajada de carga, ilustrado por la curva 61 en la figura 4A, es compensado por una inserción menor de las barras de control 40 en el núcleo 30 del reactor 100 durante la bajada de carga. La inserción menor de las barras de control 40 determinada por la posición de consigna Z permite al operador disminuir el caudal de dilución de boro por disminución del volumen de agua inyectada (zona rayada 52), o suprimir la dilución durante la bajada de carga (zona B).

Gracias a la invención, la menor inserción de las barras de control 40 permite reducir el volumen de agua de la dilución, representada por la zona rayada 52, durante la bajada de carga con respecto al volumen de agua de la dilución representada por la zona rayada 62, y por consiguiente limita los volúmenes de efluentes.

Durante la restitución de carga (zona D) siendo la subida de las barras de control más pequeña, la variación de xenón durante esta restitución de carga es compensada por esta menor inserción de las barras, lo que permite detener el caudal de boración durante la restitución de carga, es decir durante la subida de potencia del 50% al 100% de PN, tal como ilustra la figura 4C a nivel de la zona D. Así, durante la restitución de carga, el procedimiento de acuerdo con la invención permite reducir el volumen de boro inyectado en el fluido caloportador primario con respecto al volumen de boro inyectado con un procedimiento de gobierno conocido (véase la figura 4B).

Además, siendo menor la inserción de las barras de control, el procedimiento de acuerdo con la invención permite reducir el número de pasos necesarios durante un seguimiento de carga y especialmente entre un escalón alto y un escalón bajo. El procedimiento permite así reducir la solicitación de los mecanismos de desplazamiento de las barras de control.

De esta manera, el procedimiento de acuerdo con la invención permite optimizar la inserción de las barras de control en el núcleo a fin de reducir el número de pasos entre diferentes posiciones, permitiendo preservar los medios de desplazamiento de cada grupo de barras durante los años de servicio del reactor.

La inserción de los grupos de barras de control a la posición de consigna Z determinada por el procedimiento de acuerdo con la invención permite igualmente controlar la capacidad de subida de potencia correspondiente a la potencia susceptible de ser producida por el citado núcleo 30 durante la subida de las barras de control.

Este procedimiento es directamente aplicable a los diferentes modos de gobierno conocidos por el especialista en la materia, a saber los medios de gobierno denominados habitualmente modo A, modo G, modo X y modo T.

El modo de gobierno G conocido por el especialista en la materia tiene en cuenta durante la determinación de la posición de inserción de las barras de control la eventualidad de un retorno rápido al 100% de la potencia nominal por la retirada de la barras de control.

Para esto, el modo de gobierno G gobierna dos tipos de grupos de barras de control que tienen absortividades neutrónicas diferentes. Uno de los grupos tiene su posición de inserción que es función del nivel de potencia y garantiza la posibilidad de un retorno rápido a la potencia nominal PN. Por el término « rápido » se entiende una restitución de carga suficientemente rápida para que la variación de la concentración de xenón sea pequeña, es decir una restitución de carga que tenga una velocidad de progresión típicamente comprendida entre el 3% y el 5% PN/min. El otro grupo de barras de control, más pesado, está dedicado al control de temperatura media T_{med} del reactor, e indirectamente por operaciones de dilución y de boración al control de la distribución axial DA.

Los modos de gobierno X y T son modos de gobierno avanzados que, en el posicionamiento de las barras de control, tienen en cuenta la capacidad de subida en potencia $P_{máx}$.

Por capacidad de subida de potencia $P_{máx}$ se entiende la posibilidad de subir rápidamente en potencia, es decir con una velocidad de progresión comprendida típicamente entre el 2% y el 5% PN/min, de una potencia reducida a una potencia elevada (consigna Pmáx) definida previamente por el operador durante la programación del seguimiento de carga.

Así, para variaciones de potencia, y especialmente para un retorno de potencia lento, típicamente superior a una hora, la gestión de las posiciones de inserción de las barras de control no es óptima porque ésta no tiene en cuenta la evolución del efecto xenón.

El procedimiento de acuerdo con la invención permite tener en cuenta esta evolución de xenón durante una subida en potencia permitiendo así optimizar la inserción de las barras de control en el núcleo del reactor durante un seguimiento de carga « lento ».

El procedimiento de acuerdo con la invención, aplicado a los modos de gobierno G, T y X permite así mejorar los citados modos por una menor inserción de los diferentes grupos de barras de control en el núcleo del reactor, limitando así la utilización de la inyección de boro o de agua en el líquido primario necesaria para la compensación de la concentración de xenón en el fluido caloportador.

Este procedimiento de acuerdo con la invención es igualmente aplicable al modo de gobierno, denominado modo A, consistente en controlar y en regular la temperatura T_{med} y la distribución axial de potencia DA.

El modo de gobierno A es el modo más simple utilizado para gobernar los reactores nucleares durante un seguimiento de carga. Cuando hay una bajada de carga de la turbina, las barras de control son insertadas en el núcleo a fin de limitar la potencia del núcleo y así evitar un aumento de la temperatura del circuito primario de refrigeración. En este modo de gobierno, las barras de control son insertadas hasta un umbral bajo que define la limitación aceptable de perturbación de la distribución axial de potencia DA. Cuando se desee disminuir más la potencia, se procede entonces a una inyección de boro en el fluido caloportador primario a fin de aumentar su concentración y de acompañar a la bajada de la potencia primaria. En el caso de la subida de potencia, se procede a una disminución de la concentración de boro por su dilución por medio de inyección de agua.

Sin embargo, la inyección y la dilución de boro tienen una velocidad de acción limitada que no permite variaciones de potencia rápidas o de grandes amplitudes.

El procedimiento de acuerdo con la invención, aplicado al modo de gobierno A, permite así conocer la velocidad de progresión a la cual puede efectuarse la restitución de carga sin inyección de agua (es decir, sin dilución). En efecto, si la posición de consigna determinada por el procedimiento de acuerdo con la invención está en los límites permitidos, entonces la restitución de carga puede ser efectuada con la velocidad de progresión que es función de la duración de variación de potencia seleccionada. Si en cambio la posición de consigna determinada por el procedimiento de acuerdo con la invención no está en los límites permitidos, entonces es posible deducir la velocidad de progresión asociada a un caudal de dilución del fluido caloportador que permita mantenerse en los límites permitidos.

Naturalmente, la invención no está limitada a los modos de realización y a los modos de gobierno que acaban de describirse. El procedimiento de acuerdo con la invención es aplicable a todos los tipos de modo de gobierno conocidos por el especialista en la materia y no solamente a los modos de gobierno mencionados en la presente solicitud.

De acuerdo con el modo de gobierno utilizado, la posición de consigna Z determinada por el procedimiento de acuerdo con la invención que tiene en cuenta la variación de la concentración de xenón ΔX puede ser aplicada al menos a un grupo de barras de control si el reactor nuclear comprende una pluralidad de grupos de barras de control que tienen características de absorción neutrónicas diferentes como especialmente en los modos de gobierno G, X y T.

El procedimiento de acuerdo con la invención es igualmente aplicable a un modo de gobierno que limita los volúmenes de efluentes por la utilización de un grupo de barras de control previamente insertado. En este modo de gobierno, el grupo insertado permite corregir los efectos xenón (aumento de la concentración) por extracción del grupo insertado durante un seguimiento de carga. El procedimiento de acuerdo con la invención aplicado a este modo de gobierno permitiría mejorar y optimizar la colocación del grupo previamente insertado de modo que se minimicen los desplazamientos.

El procedimiento de acuerdo con la invención ha sido descrito de modo particular tomando como duración estimada el intervalo de tiempo estimado del aumento de potencia del reactor para alcanzar el valor de consigna partiendo del valor efectivo; sin embargo, el procedimiento de acuerdo con la invención es igualmente aplicable teniendo en cuenta el instante estimado de restitución de carga, es decir el final de la duración estimada del escalón a la potencia efectiva antes del aumento de potencia, lo que permite optimizar más la posición de consigna Z de las barras de control.

El procedimiento de acuerdo con la invención ha sido descrito de modo particular tomando como duración estimada el intervalo de tiempo estimado de la variación de potencia del reactor para alcanzar el valor de consigna partiendo del valor efectivo; sin embargo, el procedimiento de acuerdo con la invención es igualmente aplicable reemplazando la duración estimada del intervalo de tiempo del aumento de potencia por la pendiente del aumento de potencia del reactor para alcanzar el valor de consigna partiendo del valor efectivo, expresado por ejemplo en %/mn.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión, comprendiendo el citado reactor:

- un núcleo (30) que produce una potencia;
- una pluralidad de grupos de barras de control (40) de la reactividad del citado núcleo (30) susceptibles de ocupar en el interior del núcleo (30) una pluralidad de posiciones de inserción escalonadas verticalmente a partir de una posición alta;
- medios para adquirir magnitudes representativas de las condiciones de funcionamiento del núcleo;

comprendiendo el citado procedimiento las etapas consistentes en:

- medir la potencia efectiva (Pe) del reactor nuclear;
- adquirir un valor de consigna de la potencia objetivo (Pc) deseada del reactor nuclear (100);

estando caracterizado el citado procedimiento por que éste comprende además las etapas consistentes en:

- adquirir una duración estimada (DURACIÓN) de aumento de potencia para llegar al citado valor de consigna de la potencia objetivo (Pc) deseada, correspondiendo la citada duración estimada (DURACIÓN) a la duración de aumento de potencia para pasar de la citada potencia efectiva (Pe) al citado valor de consigna de la potencia objetivo (Pc);
- determinar la posición de consigna (Z) de al menos un grupo de barras de control entre la citada pluralidad de barras de control (40) para alcanzar el citado valor de consigna de la citada potencia objetivo (Pc) deseada en función de la citada duración estimada (DURACIÓN), de la citada potencia efectiva (Pe) medida y del citado valor de consigna de la citada potencia objetivo (Pc);
- controlar la posición del citado al menos un grupo de barras de control con el fin de colocarle en su posición de consigna (Z).

2. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión de acuerdo con la reivindicación precedente caracterizado por que el citado procedimiento comprende una etapa consistente en adquirir un instante estimado (INST) de inicio del citado aumento de potencia, correspondiendo el citado instante estimado (INST) al final del escalón de la citada potencia efectiva (Pe) y siendo tenido en cuenta en la etapa de determinación de la posición de consigna (Z) de al menos un grupo de barras de control.

3. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión de acuerdo con la reivindicación 2 caracterizado por que la citada etapa de control es realizada de modo que el citado al menos un grupo de barras de control quede situado en su posición de consigna (Z) como muy tarde al inicio del citado aumento de potencia.

4. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3 caracterizado por que el citado procedimiento comprende una etapa de regulación de la concentración de boro en el fluido caloportador en función de la citada posición de consigna (Z) de al menos un grupo de barras de control entre la citada pluralidad de barras de control (40) por operaciones de dilución y/o de boración del fluido caloportador primario del citado reactor nuclear (100).

5. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4 caracterizado por que la citada etapa de determinación de la citada posición de consigna (Z) del citado al menos un grupo de barras de control es realizada a través de medios de software que ponen en práctica un código neutrónico.

6. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5 caracterizado por que la citada etapa de determinación de la citada posición de consigna (Z) del citado al menos un grupo de barras de control comprende:

- una subetapa de determinación de una primera posición (dZ) de al menos un grupo de barras de control en función de la citada potencia efectiva (Pe) medida y del citado valor de consigna de la potencia objetivo (Pc);
- una subetapa de determinación de la variación de la concentración de xenón (ΔX) en el citado núcleo del citado reactor durante el futuro aumento de potencia, siendo la citada variación de concentración de xenón (ΔX) función de la citada duración estimada (DURACIÓN), y/o de la citada potencia efectiva medida (Pe) y/o del citado valor de consigna de la potencia objetivo (Pc),
- una subetapa de determinación de un factor corrector (dZc) de la posición de al menos un grupo de barras de control función de la citada variación de la concentración de xenón.

7. Procedimiento de gobierno de un reactor nuclear (100) de agua a presión de acuerdo con una de las reivindicaciones 2 a 5 caracterizado por que la citada etapa de determinación de la citada posición de consigna (Z) del citado al menos un grupo de barras de control comprende:

- una subetapa de determinación de una primera posición (dZ) de al menos un grupo de barras de control en función de la citada potencia efectiva (Pe) medida y del citado valor de consigna de la potencia objetivo (Pc);

- una subetapa de determinación de la variación de la concentración de xenón (ΔX) en el citado núcleo del citado reactor durante el futuro aumento de potencia, siendo la citada variación de concentración de xenón (ΔX) función de la citada duración estimada (DURACIÓN), y/o de la citada potencia efectiva medida (Pe) y/o del citado valor de consigna de la potencia objetivo (Pc), y/o del citado instante estimado (INST) de inicio del aumento de potencia;;

- una subetapa de determinación de un factor corrector (dZc) de la posición de al menos un grupo de barras de control función de la citada variación de la concentración de xenón.

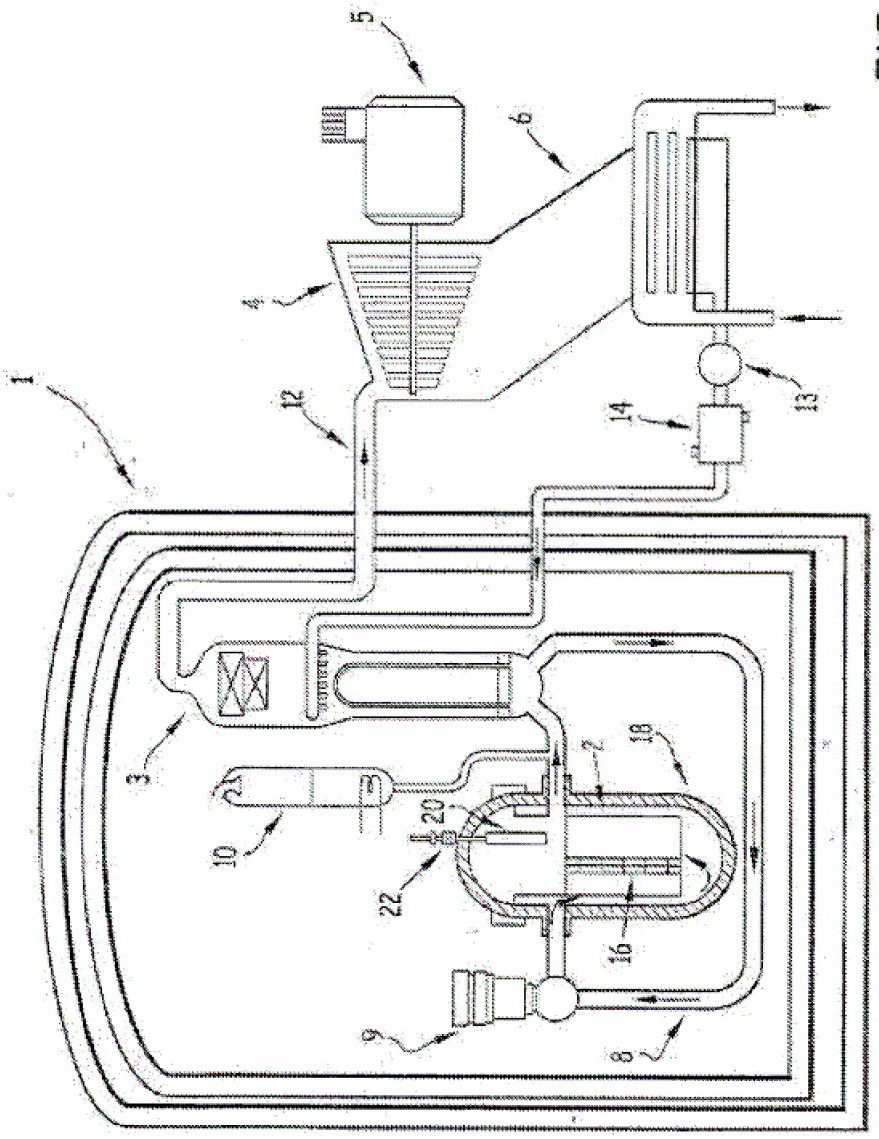

FIG.1

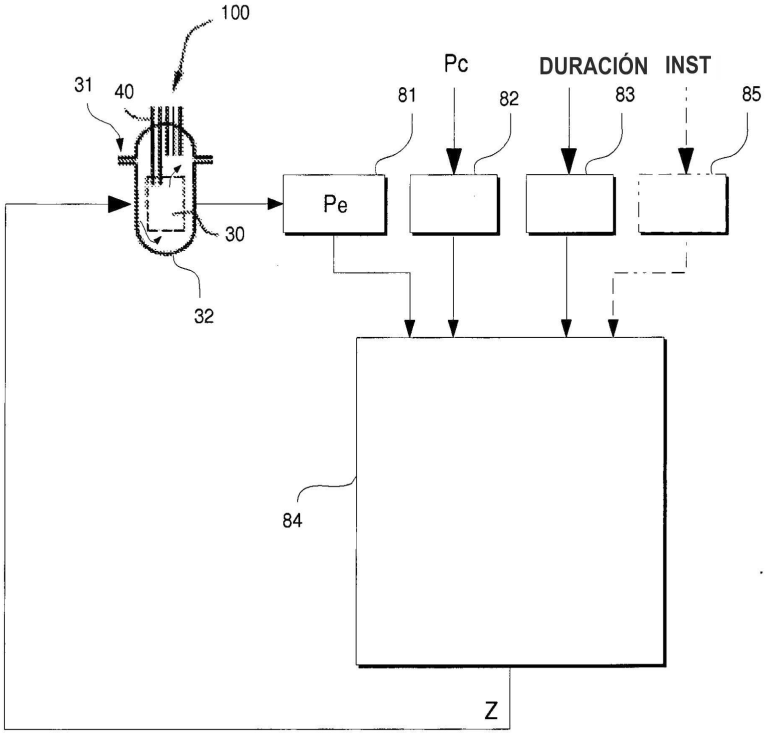

FIG. 2

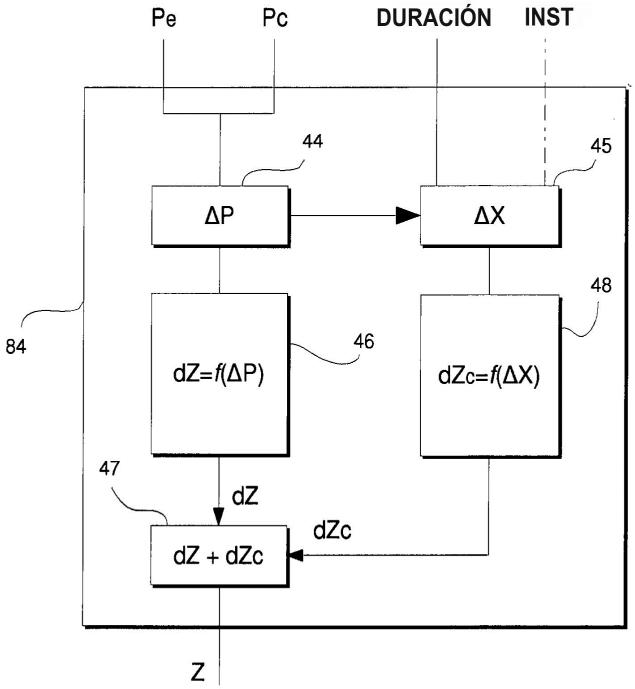
Pe
Pc
DURACIÓN
INST
44
45
ΔP
ΔX
48
84
46
dZ=f(ΔP)
dZc=f(ΔX)
47
dZ
dZc
dZ + dZc
Z

FIG. 3

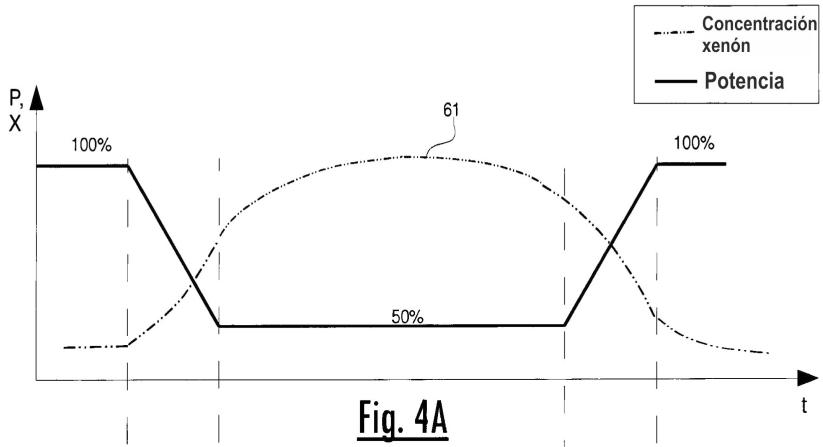

Fig. 4A

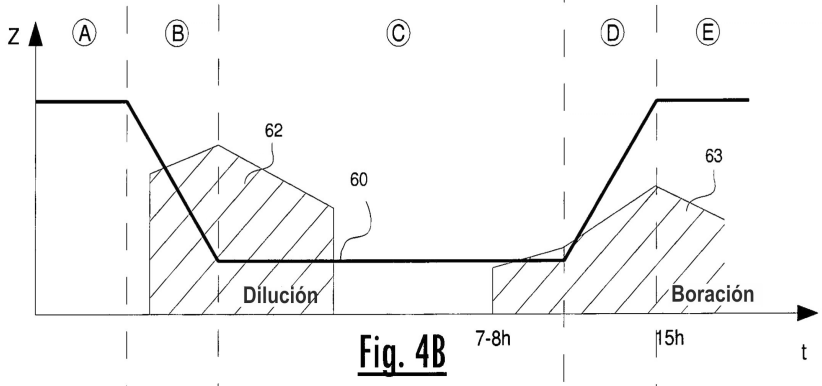

Fig. 4B

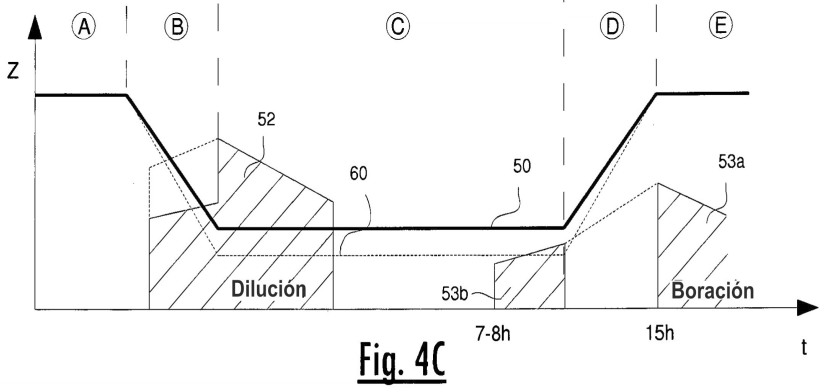

Fig. 4C