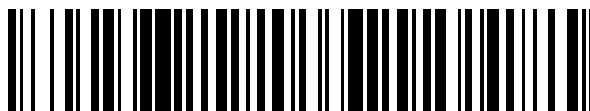


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 718 406**

51 Int. Cl.:

F01K 13/02 (2006.01)

F01K 23/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.08.2016** E 16306083 (3)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2019** EP 3287612

54 Título: **Control de HRSG para un funcionamiento por aire fresco optimizado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
01.07.2019

73 Titular/es:

**L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME POUR
L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCEDES
GEORGES CLAUDE (100.0%)
75, Quai d'Orsay
75007 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**FONNE, OLIVIER;
GREE, STÉPHANE;
MARINUS, DAVE y
SEGRET, JACQUES**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 718 406 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

Control de HRSG para un funcionamiento por aire fresco optimizado

La presente invención se refiere a unidades de cogeneración y en particular al funcionamiento por aire fresco de unidades de cogeneración.

5 Las unidades de cogeneración o unidades Cogen (en lo sucesivo denominadas también por la abreviación "CU") son instalaciones que están concebidas simultáneamente para generar tanto (a) energía, en particular electricidad, como (b) vapor, o calor en forma de vapor, por medio de la combustión de combustible, de ahí el término "cogeneración". Los documentos EP1903282 A2, EP2246532 A1 y EP1344977 A1 describen unidades de cogeneración.

10 En las CU, se emplea una turbina de gas (en lo sucesivo denominada también por la abreviación "GT") para generar electricidad. El gas de escape caliente de la GT se emplea para generar vapor en un generador de vapor de recuperación de calor" (en lo sucesivo denominado también por la abreviación "HRSG").

La GT, el HRSG y la CU en conjunto están concebidos para proporcionar un óptimo rendimiento energético en la modalidad de funcionamiento de cogeneración descrita anteriormente.

El vapor generado en el procedimiento de cogeneración puede emplearse:

- 15
- como tal, para satisfacer las demandas de vapor de instalaciones aguas abajo, y/o
 - como fuente de calor para satisfacer las necesidades de calor de tales instalaciones.

En lo sucesivo, se hará referencia a suministro de vapor, demanda de vapor y necesidad de vapor independientemente de si dicho vapor se emplea como tal o como fuente de calor.

20 Existe una mayor necesidad de que las CU sean más flexibles con relación a la producción de electricidad a la vez que se mantiene en todo momento el suministro de vapor o calor necesario a los clientes industriales independientemente del nivel de producción de electricidad.

Por ejemplo, cuando los precios del mercado de la electricidad son tan bajos que hacen que la generación de la misma por parte de la GT de la CU no sea rentable, lo ideal sería que se parara la GT. Al mismo tiempo, la demanda de vapor se debe seguir satisfaciendo.

25 Es conocido en la técnica el recurso de apagar el HRSG en tal situación y generar el vapor necesario por medio de una caldera de reserva aparte. Dicho método conocido presenta la desventaja de que requiere la presencia de tal caldera de reserva en el sitio. Además, se requiere un período de tiempo significativo para que la caldera de reserva alcance su temperatura operativa.

30 Una alternativa es hacer funcionar únicamente el HRSG de la CU cuando la GT no está en funcionamiento, es decir, hacer funcionar el HRSG por sí solo sin que el mismo reciba ningún gas de escape de la GT. Esta modalidad de funcionamiento de la CU y del HRSG es conocida en la técnica como funcionamiento por aire fresco (en lo sucesivo denominado también por la abreviación "FAO").

35 Se indica que el término "fresco" en "funcionamiento por aire fresco" no se refiere a la temperatura del aire de combustión introducido en el HRSG, sino más bien al hecho de que dicho aire se suministra al HRSG sin que primero se haya empleado como oxidante de combustión en la GT.

Durante el FAO, el HRSG actúa como una caldera autónoma, según lo cual el calor para la producción de vapor se genera dentro del HRSG quemando combustible con aire de combustión.

40 El FAO se desarrolló originalmente como un modo de reserva para mantener la producción de vapor de una CU cuando la GT se detiene un breve tiempo para el mantenimiento o durante un viaje o parada no previstos. Por lo tanto, el rendimiento energético durante el FAO no era una preocupación principal.

Sin embargo, cuando el FAO se emplea como una modalidad de funcionamiento alternativa de la CU, en particular en los momentos de baja demanda de electricidad o bajos precios de la misma, el rendimiento energético durante el FAO de una CU pasa a ser fundamental.

45 Es conocido en la técnica el recurso de limitar el consumo de combustible adaptando el suministro del mismo al HRSG en función de la demanda instantánea de vapor de la(s) instalación(es) consumidora(s) de vapor aguas abajo, a la vez que se mantiene el suministro de aire al HRSG a un nivel constante que sea lo suficientemente alto como para garantizar la seguridad del Funcionamiento por Aire Fresco del HRSG a la demanda más alta posible de vapor.

50 Por el documento EP-A-1344977, es conocido que se mejora el rendimiento energético del HRSG durante el FAO mediante el reciclaje de parte del humo evacuado del HRSG de vuelta a la entrada del HRSG junto con aire de combustión fresco. La presente invención trata de proporcionar una forma alternativa o adicional de mejorar el

rendimiento energético de un HRSG durante el FAO de una CU.

Según la presente invención, esto se logra por medio de un método expuesto según la reivindicación 1.

En el presente contexto, el término “demanda instantánea de vapor” se refiere a la cantidad de vapor que se espera que la CU genere o suministre en un momento dado, a diferencia de la demanda de vapor media o nominal que se espera que la CU satisfaga.

Durante dicho FAO de la CU, el combustible se combustiona con el aire en el HRSG por medio de una estructura de quemador. Dicha combustión genera calor, que se emplea para generar vapor en una estructura de intercambio de calor del HRSG aguas abajo de la estructura de quemador, así como humo, que se evacúa del HRSG.

El método expuesto según la presente invención incluye las operaciones de:

- a. recibir una señal de entrada Θ_i , según lo cual dicha señal de entrada Θ_i corresponde a/refleja la demanda instantánea de vapor de la(s) instalación(es) consumidora(s) de vapor;
- b. generar una señal de demanda instantánea de combustible F_o como función de la señal de entrada Θ_i ; y
- c. regular el suministro de combustible al HRSG como función de la señal de demanda de combustible F_o .

Un experto en la técnica está familiarizado con el modo en que puede regularse el suministro de combustible a un generador de vapor en función de la energía necesaria para satisfacer una demanda dada de vapor.

El método expuesto según la invención incluye además las operaciones de:

- d. procesar una señal Θ a partir de la señal de entrada Θ_i a una señal de salida Θ_o en un procedimiento de lazo abierto (frente a un procedimiento de lazo cerrado);
- e. generar una señal de demanda de aire A_o como primera función predeterminada de Θ_o , es decir, $A_o = f_1(\Theta_o)$; y
- f. regular el suministro de aire al HRSG según dicha señal de demanda de aire A_o .

Para cada valor de la señal de salida Θ_o procesada, la función predeterminada f_1 genera un valor óptimo para la señal de demanda de aire A_o , con relación al rendimiento energético de la generación de vapor, teniendo en cuenta los diferentes factores tales como el oxígeno para la combustión de combustible y los caudales de gas en contacto con la estructura de intercambio de calor.

Con el método expuesto según la presente invención, es posible hacer funcionar la CU en FAO para generar vapor con un alto rendimiento energético y empleando el equipo ya utilizado durante la cogeneración, en particular el HRSG de la CU.

La primera función predeterminada f_1 se obtiene preferiblemente determinando experimentalmente el valor óptimo del suministro de aire al HRSG, y por consiguiente también de la correspondiente señal de demanda de aire A_o óptima, para diferentes niveles de demanda de vapor, es decir, para diferentes niveles de generación de vapor por parte del HRSG durante el FAO. De este modo, se determina la señal de demanda de aire A_o para diferentes valores de la señal de salida Θ_o .

Según una realización preferida de la invención, el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación inicial consistente en amortiguar la señal de entrada Θ_i , en particular por medio de un filtro dinámico. Dicho de otro modo, según la presente realización, la suboperación inicial del procedimiento de lazo abierto consiste en generar una señal Θ que corresponda a la señal de entrada Θ_i amortiguada.

De este modo, se evita que la señal de salida Θ_o de lazo abierto y la correspondiente señal de demanda de aire A_o fluctúen como respuesta a breves variaciones, conocidas como “ruido”, en la señal de entrada Θ_i recibida. Tal ruido, dada su corta duración, no requiere ni justifica cambiar el suministro de aire al HRSG. Por consiguiente, amortiguando la señal de entrada Θ_i se obtiene un funcionamiento más estable del HRSG de FAO.

La señal Θ amortiguada resultante puede emplearse también ventajosamente como valor de entrada para generar la señal de demanda de combustible F_o , evitando de este modo fluctuaciones en el suministro de combustible al HRSG como respuesta al ruido en la señal de entrada Θ_i .

El HRSG comprende de manera útil un sensor de presión que detecta una presión P_f en el HRSG aguas arriba de la estructura de quemador.

En ese caso, la presión P_f detectada por el sensor de presión se compara preferiblemente con una presión mínima predeterminada P_{min} , mientras que el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación final consistente en aumentar la señal Θ por medio de un controlador PID, que actúa como controlador override, si $P_f < P_{min}$, lo que da como resultado un aumento en la señal de salida Θ_o de lazo abierto.

El HRSG comprende de manera útil un sistema de medición de temperatura que determina una primera temperatura del gas Tg^1 en el HRSG entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor. El sistema de medición de temperatura puede contener un solo sensor de temperatura instalado entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor, pero comprende preferiblemente al menos dos sensores de temperatura instalados entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor del HRSG. Cuando el sistema de medición de temperatura comprende dos o más de tales sensores de temperatura, la primera temperatura Tg^1 es o bien el valor medio de las temperaturas detectadas por los sensores de temperatura individuales o bien, preferiblemente, la más alta de las temperaturas detectadas por los sensores de temperatura individuales. La primera temperatura Tg^1 determinada se compara entonces ventajosamente con una temperatura máxima predeterminada $Tmax$ y el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación final consistente en aumentar la señal Θ por medio de un controlador PID, que actúa como controlador override, si $Tg^1 > Tmax$. Esto de nuevo da como resultado un aumento en la señal de salida Θ_o de lazo abierto.

Es también posible y útil combinar las dos opciones anteriores. En ese caso el HRSG comprende un sistema de medición de temperatura que determina una primera temperatura del gas Tg^1 en el HRSG entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor y un sensor de presión que detecta una presión Pf aguas arriba de la estructura de quemador. La temperatura Tg^1 determinada se compara con una temperatura máxima predeterminada $Tmax$ y la presión Pf detectada se compara con una presión mínima predeterminada $Pmin$. El procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación final consistente en aumentar la señal Θ por medio de un controlador PID, que actúa como controlador override, lo que aumenta por consiguiente la señal de salida Θ_o de lazo abierto, si $Tg^1 > Tmax$ y/o si $Pf < Pmin$.

Según otra realización del método de la presente invención, el HRSG comprende un sistema de medición de temperatura que determina una segunda temperatura del gas Tg^2 en el HRSG entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor. Este sistema de medición de temperatura puede contener un solo sensor de temperatura instalado entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor, pero del mismo modo comprende preferiblemente al menos dos sensores de temperatura instalados entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor del HRSG. Cuando el sistema de medición de temperatura comprende dos o más de tales sensores de temperatura, la segunda temperatura Tg^2 es el valor medio de las temperaturas detectadas por los sensores de temperatura individuales. La segunda temperatura Tg^2 determinada se compara con una temperatura óptima predeterminada $Topt$ y el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación consistente en aumentar la señal Θ cuando $Tg^2 > Topt$ y/o en disminuir la señal Θ cuando $Tg^2 < Topt$. Preferiblemente, la señal Θ se aumenta cuando $Tg^2 > Topt$ y se disminuye cuando $Tg^2 < Topt$. Cuando se compara la segunda temperatura Tg^2 determinada con la temperatura óptima predeterminada $Topt$, el margen de error de la segunda temperatura Tg^2 determinada típicamente se tiene en cuenta. La temperatura óptima predeterminada $Topt$ puede ser constante o puede ser una función de la demanda de vapor que el HRSG debe satisfacer. En el último caso, $Topt$ puede, por ejemplo, determinarse experimentalmente, en particular durante los experimentos a través de los cuales se ha obtenido la primera función predeterminada $f1$. Según una realización, durante el FAO del HRSG, la señal de salida Θ_o de lazo abierto está limitada a un intervalo predeterminado $[\Theta_{min}, \Theta_{max}]$, con $\Delta\Theta = \Theta_{max} - \Theta_{min}$. Θ_{min} corresponde a la señal de salida más baja posible generada por el procedimiento de lazo abierto durante el FAO y puede ser 0 (cero). Un valor Θ_{min} de 0 se emplea óptimamente para reflejar una demanda de cero vapor en el HRSG por parte de la(s) instalación(es) consumidora(s) de vapor aguas abajo. Θ_{max} corresponde a la señal de salida más alta posible generada por el procedimiento de lazo abierto durante el FAO. Θ_{max} puede seleccionarse en particular de modo que corresponda al valor de la señal de salida de lazo abierto a la demanda de vapor más alta posible de la(s) instalación(es) consumidora(s) de vapor aguas abajo que el HRSG pueda tener que satisfacer durante el FAO.

Cuando la señal de salida Θ_o de lazo abierto está limitada a un intervalo predeterminado $[\Theta_{min}, \Theta_{max}]$, resulta ventajoso en la anterior suboperación de la operación d aumentar la señal Θ por un valor no superior a $\Delta\Theta/10$, sin exceder el valor máximo de Θ_{max} , cuando $Tg^2 > Topt$ y disminuir la señal Θ por un valor no superior a $\Delta\Theta/10$ cuando $Tg^2 < Topt$ sin descender por debajo del valor mínimo de Θ_{min} .

Cuando el HRSG comprende un sistema de medición de temperatura para determinar la primera temperatura del gas Tg^1 que se compara con $Tmax$ en una suboperación final del procedimiento de lazo abierto de la operación d, como se ha descrito anteriormente, puede emplearse entonces el mismo sistema de medición de temperatura para determinar la segunda temperatura del gas Tg^2 que se compara con $Topt$. Cuando se emplea el mismo sistema de medición de temperatura para determinar la primera temperatura Tg^1 y la segunda temperatura Tg^2 y el valor medio de las temperaturas detectadas por los sensores de temperatura individuales se emplea como Tg^1 , se emplea entonces la misma temperatura determinada como Tg^1 para la comparación con $Tmax$ y como Tg^2 para la comparación con $Topt$.

El procedimiento de lazo abierto de la operación d típicamente comprende también una función de sesgo, por ejemplo inmediatamente aguas abajo del filtro dinámico/amortiguación en el proceso de lazo abierto (empleado como suboperación inicial). A través de esta función de sesgo, el operador puede intervenir en el procedimiento que de otro modo es automático y sesgar la señal Θ (hacia arriba o hacia abajo).

El suministro de combustible al HRSG se regula típicamente regulando la apertura de una válvula de suministro de

combustible aguas arriba del HRSG, según lo cual, como se ha indicado anteriormente, el suministro de combustible al HRSG se regula según la señal de demanda de combustible F_o .

5 El suministro de aire puede regularse regulando la apertura de una compuerta de aire fresco aguas arriba del HRSG, según lo cual, como se ha indicado anteriormente, el suministro de aire al HRSG se regula según la señal de demanda de aire A_o .

El suministro de aire puede regularse también regulando la velocidad de un ventilador con variador de velocidad incorporado en la línea de suministro de aire aguas arriba del HRSG según la señal de demanda de aire A_o .

Es también posible una combinación de ambos.

10 Según una realización energéticamente útil, el HRSG comprende además un reciclado de humo para reciclar el humo del HRSG de vuelta al HRSG.

En ese caso, el método expuesto según la presente invención incluye preferiblemente las operaciones de:

g. generar una señal de reciclado de humo R_o según una segunda función predeterminada f_2 de la señal de salida Θ_o de lazo abierto, es decir, $R_o = f_2(\Theta_o)$, y

h. regular el suministro de humo reciclado al HRSG según dicha señal de reciclado de humo R_o .

15 La segunda función f_2 genera un valor para la señal de reciclado de humo R_o que, junto con la señal de demanda de aire A_o generada por la primera función f_1 , permite un rendimiento energético óptimo de generación de vapor.

20 Preferiblemente, tanto la primera como la segunda funciones predeterminadas f_1 y f_2 se obtienen determinando experimentalmente, durante el FAO del HRSG, el valor óptimo combinado del suministro de aire, y por consiguiente también de la señal de suministro de aire A_o , y un valor óptimo del reciclado de humo, y por consiguiente también de la señal de reciclado de humo R_o , para diferentes niveles de generación de vapor de FAO por parte del HRSG, y por consiguiente también para diferentes valores de la señal de salida Θ_o de lazo abierto. Los principios de la determinación experimental se han descrito anteriormente únicamente con respecto a la primera función f_1 .

25 Se valorará que cuando el HRSG está equipado con un reciclado de humo de modo que, durante el FAO del HRSG, se suministra o se puede suministrar una combinación de aire fresco y humo reciclado al HRSG, la regulación combinada del suministro de aire en la operación f y del suministro de humo reciclado en la operación h puede realizarse regulando (a) el suministro o flujo total combinado de aire fresco y humo reciclado y (b) la proporción entre los suministros o flujos individuales de aire fresco y de humo reciclado al HRSG. La invención como se describe anteriormente incluye métodos que aplican esta forma de regulación.

30 El suministro de humo reciclado puede regularse regulando la apertura de una compuerta de reciclado de humo del reciclado de humo, según lo cual, como se ha indicado anteriormente, dicho suministro de humo reciclado al HRSG se regula según dicha señal de reciclado de humo R_o .

El suministro de humo reciclado puede regularse también regulando la velocidad de un ventilador con variador de velocidad incorporado en el reciclado de humo.

Es también posible una combinación de ambos.

35 El HRSG puede comprender también un sensor de oxígeno que detecta la concentración de oxígeno C_{oxf} en el humo que sale del HRSG. En ese caso, el método de la invención puede incluir ventajosamente las operaciones adicionales de:

i. comparar la concentración de oxígeno C_{oxf} detectada con un valor objetivo de humo oxígeno C_{set} , y

40 j. ajustar la señal de demanda de aire A_o y/o la señal de reciclado de humo R_o , aguas arriba de las respectivas operaciones de regulación del suministro de aire y de regulación del suministro de humo reciclado, de modo que aumente la proporción entre el aire suministrado y el humo reciclado cuando $C_{oxf} < C_{set}$ y de modo que disminuya la proporción entre el aire suministrado y el humo reciclado cuando $C_{oxf} > C_{set}$.

45 C_{set} puede depender del nivel de generación de vapor por parte del HRSG durante el FAO. Entonces C_{set} puede expresarse como una función de la señal de entrada amortiguada, de la señal de demanda de combustible F_o o de la señal de salida Θ_o de lazo abierto.

50 El ajuste de la señal de demanda de aire A_o y/o de la señal de reciclado de humo R_o en la operación i se maneja preferiblemente de modo que la cantidad total de aire y de humo reciclado suministrados al HRSG, expresada en Nm^3/h , permanezca substancialmente constante, es decir, la cantidad total de aire y de humo reciclado suministrados al HRSG tras el ajuste en la operación j sea substancialmente idéntica a la cantidad total de aire y de humo reciclado al HRSG que habría sido suministrada al mismo sin el ajuste de la señal de demanda de aire A_o y/o la señal de reciclado de humo R_o en la operación j .

En el presente contexto, el suministro o caudal de gas, expresado en Nm³/h, se considera que es substancialmente constante cuando su variación permanece dentro de un 2,5 % y dos valores de tal tasa de suministro de gas se consideran substancialmente idénticos cuando la diferencia entre los dos valores no es superior al 2,5 % del primer valor.

5 Cuando el HRSG está equipado además con un precalentador de aire fresco, el método expuesto según la presente invención puede incluir la regulación de la temperatura a la cual se precalienta el aire fresco durante el FAO aparte de la regulación del suministro de dicho aire fresco al HRSG. La regulación de la temperatura a la cual se precalienta el aire fresco se realiza entonces según una señal de temperatura del aire Ta generada, según lo cual $T_a = f_3(\Theta_o)$, siendo f3 una tercera función predeterminada f3 de la señal de salida Θ_o de lazo abierto. Como se ha explicado anteriormente con respecto a la primera y segunda funciones predeterminadas f1 y f2, la tercera función predeterminada f3 puede en particular determinarse experimentalmente, en combinación con la primera función predeterminada f1 y, donde sea aplicable, también en combinación con la segunda función predeterminada f2.

La presente invención y sus ventajas se ilustran a continuación, haciendo referencia a las figuras 1 a 6, según las cuales:

- 15 • la figura 1 es una representación esquemática de una primera realización de una CU,
- la figura 2 es una primera representación esquemática de la interacción entre el control del procedimiento y el hardware durante el FAO de la CU de la figura 1,
- la figura 3 es una segunda representación esquemática de la interacción entre el control del procedimiento y el hardware durante el FAO de la CU de la figura 1 que presenta detalles del procedimiento de lazo abierto,
- 20 • la figura 4 es una representación esquemática de una segunda realización de una CU,
- la figura 5 es una primera representación esquemática de la interacción entre el control del procedimiento y el hardware durante el FAO de la CU de la figura 4, y
- la figura 6 es una segunda representación esquemática de la interacción entre el control del procedimiento y el hardware durante el FAO de la CU de la figura 4 que presenta detalles del procedimiento de lazo abierto.

25 En las figuras 2 y 5, el procedimiento de lazo abierto completo se representa como incluido en el bloque 50 que recibe la señal de entrada Θ_i y cualquier parámetro detectado T_g^1 , T_g^2 , Pf, Coxf, etc., y en la memoria del cual se almacenan las funciones predeterminadas f1, f2, y las condiciones de frontera Tmax, Pmin, Θ_{max} , Θ_{min} , etc.

30 Se valorará que, mientras que en lo anterior y en las figuras 3 y 6, el procedimiento de lazo abierto se ha descrito de modo que comprende uno o más controladores/correctores/operadores de sesgo sucesivos, el lazo abierto completo puede ejecutarse en una única unidad de procesamiento (PU), en particular por medio de un programa informático.

La presente invención se basa en una nueva lógica de control en el campo del FAO de las CU.

35 Con el fin de sacar el máximo provecho de las partes existentes de la CU y lograr un rendimiento energético mejorado durante el FAO independientemente de la demanda de vapor que el HRSG deba satisfacer (dentro de los límites de funcionamiento de la CU), es necesario regular el flujo total de gas a través del HRSG, en particular regulando el suministro de aire fresco al HRSG y, cuando sea asequible y apropiado, regulando también el suministro de humo reciclado al HRSG.

40 Como norma, el mejor rendimiento energético se obtiene maximizando la temperatura de fuego (lo que implica rebajar el flujo de gases de combustión dentro del HRSG) y, cuando sea asequible, maximizando la proporción de humo reciclado en relación al aire fresco, a la vez que se mantiene una combustión estable y eficiente del combustible por medio de la estructura de quemador y que se respetan las limitaciones físicas y normativas de la instalación. Ejemplos de tales limitaciones son: emisiones de CO, emisiones de NOx, temperatura máxima de los tubos del supercalentador, temperatura máxima de fuego, temperatura mínima de la chimenea, presión mínima del HRSG, etc.

El suministro de combustible y la cantidad correspondiente de oxígeno de combustión con que se alimenta el HRSG están directamente vinculados a la demanda de vapor que el HRSG debe satisfacer.

45 Se dispone de un mayor grado de ajustabilidad durante el FAO para los siguientes parámetros del HRSG:

- el suministro de aire fresco al HRSG (siempre que el suministro de aire no descienda por debajo del umbral necesario para la combustión del combustible),
- el suministro de humo reciclado al HRSG (si se dispone de un reciclado de humo), y
- la temperatura a la que se precalienta el aire fresco (si se dispone de un precalentador).

50 El suministro total de aire fresco puede, por ejemplo, ajustarse:

- ajustando la apertura de una compuerta de aire y/o
- ajustando la velocidad de un ventilador con variador de velocidad empleado para hacer circular el aire fresco.

El suministro de humo reciclado puede, por ejemplo, ajustarse:

- ajustando la apertura de una compuerta de recirculación y/o
- 5 • ajustando la velocidad de un ventilador con variador de velocidad incorporado en el reciclado de humo.

La temperatura del aire fresco suministrado al HRSG puede, por ejemplo, ajustarse ajustando el flujo de una fuente de calor, y en particular un fluido de transferencia de calor, al precalentador de aire.

10 Para una demanda dada de vapor durante el FAO y el correspondiente suministro de combustible al HRSG, el rendimiento energético del HRSG puede optimizarse ajustando el suministro de aire fresco al HRSG y opcionalmente también uno o ambos de los otros parámetros ajustables mencionados anteriormente, asociando por ejemplo una cierta posición de la(s) compuerta(s) de aire fresco, de la compuerta de recirculación de humo y/o la velocidad del único o más ventiladores con variador de velocidad si están instalados tales ventiladores con velocidad variable.

15 Según la presente invención, el parámetro o parámetros ajustable(s) empleado(s) está(n) regulado(s) en función de una señal de salida Θ_o que se ha generado por el procedimiento de lazo abierto de una señal Θ a partir de una señal de entrada Θ_i que refleja la demanda instantánea de vapor por parte de una o más instalaciones consumidoras de vapor aguas abajo del HRSG.

20 La figura 1 presenta una CU en la cual el suministro de aire fresco y el suministro de humo reciclado 3 al HRSG 1 pueden controlarse respectivamente por medio de una compuerta de aire fresco 7 y una compuerta de recirculación de humo 4. En este caso, los parámetros ajustables son la apertura de la compuerta de aire 7 y la apertura de la compuerta de recirculación de humo 4.

La figura 4 presenta una CU en la cual el suministro de aire fresco y el suministro de humo reciclado al HRSG pueden controlarse por medio de una combinación de una compuerta de aire fresco 7, una compuerta de recirculación de humo 4 y un ventilador con variador de velocidad 15.

25 En este caso, los parámetros ajustables son la apertura de la compuerta de aire 7, la apertura de la compuerta de recirculación de humo 4 y la velocidad del ventilador 15.

Como se ilustra en las figuras 1 a 3, respectivamente 4 a 6, se recibe una señal de entrada Θ_i . La señal de entrada Θ_i refleja la demanda instantánea de vapor de una instalación consumidora de vapor aguas abajo. La demanda instantánea de vapor corresponde a una necesidad de energía térmica del HRSG 1 que en el FAO actúa como una caldera autónoma y no recibe energía térmica en forma de gas de escape de la turbina de gas 11.

30 El primer controlador 101 procesa la señal de entrada Θ_i para obtener una señal de demanda de combustible F_o y se regula en consecuencia la apertura de la válvula de suministro de combustible 102 de modo que se genere un suministro de combustible 6 a partir de la fuente de combustible 53 a la estructura de quemador 9 que sea suficiente para permitir al HRSG 1 satisfacer la demanda instantánea de vapor de la instalación aguas abajo.

35 La señal de entrada Θ_i se envía también a un procedimiento de lazo abierto en el cual se procesa una señal Θ a partir de la señal de entrada Θ_i para obtener una señal de salida Θ_o . Como primera operación del procedimiento de lazo abierto, se elimina el ruido de la señal de entrada Θ_i en la compuerta 110.

40 Como se ilustra en la figura 6, el controlador 101, que genera la señal de demanda de combustible F_o , puede ubicarse de forma alternativa aguas abajo de la compuerta 110. Dicho de otro modo, el primer controlador 101 puede generar una señal de demanda de combustible Θ_i , a partir de la señal de entrada amortiguada y no de la señal de entrada Θ_i en bruto (sin amortiguar) como se ilustra en la figura 3.

La amortiguación de la señal de entrada Θ_i se logra típicamente por medio de un filtro dinámico y proporciona estabilidad adicional al procedimiento de lazo abierto y al/a los valor(es) del/de los parámetro(s) ajustable(s) basado(s) en la señal de salida Θ_o de lazo abierto.

45 El segundo controlador 120 permite aplicar un sesgo operativo a la señal Θ generada por la compuerta 110 en respuesta a una señal de sesgo 121 del operador (que puede ser un operador automatizado, no presentado), por ejemplo con el fin de permitir un continuo funcionamiento seguro o un apagado seguro tras un incidente imprevisto. A pesar de que el segundo controlador 120 se presenta inmediatamente a continuación de la compuerta 110, el segundo controlador 120 puede estar también ubicado en otras ubicaciones en el procedimiento de lazo abierto entre la recepción de la señal de entrada Θ_i y la salida de la señal de salida Θ_o .

50 El tercer controlador 130 recibe una temperatura del gas T_{g^2} , denominada "segunda temperatura", que se determina mediante un sistema de medición de temperatura (no presentado) en el HRSG 1. Tal sistema de medición de temperatura puede por ejemplo comprender un o preferiblemente más de un sensor de temperatura ubicado entre la

estructura de quemador 9 y la estructura de intercambio de calor (no presentada) del HRSG 1 en el cual se genera el vapor y se lleva a la temperatura y presión necesarias. Cuando el sistema de medición de temperatura comprende varios sensores de temperatura, la segunda temperatura Tg^2 es preferiblemente el valor medio de las temperaturas detectadas por los diferentes sensores. Cuando la segunda temperatura Tg^2 determinada difiere de una temperatura óptima predeterminada $Topt$ (o queda fuera de un correspondiente intervalo de temperatura óptima predeterminada), la señal Θ generada por el segundo controlador 120 se corrige de modo que se reduzca la diferencia entre la segunda temperatura del gas Tg^2 y la temperatura óptima $Topt$ (o el intervalo de temperatura óptima). La corrección de la señal Θ es típicamente a una escala limitada. Por ejemplo, la corrección puede restringirse a no más de una décima parte de la diferencia entre los valores de la señal Θ correspondientes a respectivamente la máxima y la mínima demanda de vapor que el HRSG puede tener que satisfacer durante el FAO. El tercer controlador 130 proporciona el afinamiento de la señal Θ y por consiguiente también de los parámetros ajustables. La temperatura óptima $Topt$ puede ser constante o puede depender de la demanda de vapor que el HRSG 1 tiene que satisfacer, por ejemplo de modo que se reduzca la temperatura de fuego en el HRSG 1 a más altas demandas de vapor.

Uno o más controladores override garantizan que uno o más parámetros decisivos del procedimiento permanezcan en todo momento dentro de unos límites aceptables. Ejemplos de dicho parámetros decisivos del procedimiento pueden ser la presión y la temperatura dentro del HRSG, en particular Pf y otra temperatura del gas Tg^1 .

En las realizaciones ilustradas, se emplea un controlador override 140 de presión y temperatura combinadas. El controlador override 140 garantiza que la temperatura de fuego en el HRSG no exceda el límite superior de seguridad $Tmax$, que típicamente queda dentro del intervalo de 750 °C a 900 °C. En relación con esto, el sistema que mide la temperatura determina dicha otra temperatura del gas Tg^1 , denominada "primera temperatura". Cuando el sistema de medición de temperatura comprende únicamente un sensor de temperatura, $Tg^1 = Tg^2$.

Cuando el sistema que mide la temperatura comprende varios sensores de temperatura, la primera temperatura Tg^1 es preferiblemente la más alta de las temperaturas detectadas por los diferentes sensores, de modo que Tg^1 puede ser diferente de Tg^2 . Si la primera temperatura del gas Tg^1 detectada en el HRSG 1 excede la temperatura máxima $Tmax$ permisible, el controlador override 140 aumenta la señal Θ generada por el tercer controlador 130. Como se hará evidente a continuación, dicho aumento de la señal Θ lleva a un aumento en el suministro de aire fresco y opcionalmente también en el suministro 3 de humo reciclado al HRSG 1 y una caída en la temperatura de fuego en el HRSG 1. De un modo similar, el controlador override 140 aumenta la señal Θ cuando la presión Pf (también conocida como presión del conducto de la caldera) en el HRSG 1 cae por debajo de un límite de seguridad más bajo $Pmin$. Una presión Pf del conducto de la caldera suficiente es un criterio clave para el funcionamiento seguro de la estructura de quemador 9. $Pmin$ típicamente queda en el intervalo [3 mbar, 5 mbar].

Los controladores override 140 actúan de manera útil como un control de lazo cerrado.

Pueden incluirse parámetros decisivos adicionales en la operación de neutralización del controlador 140, tales como, por ejemplo, la temperatura máxima del vapor (por motivos de seguridad) o los niveles máximos de contaminantes en el humo (que a menudo están sometidos a restricciones legales). La conveniencia de incluir parámetros de neutralización adicionales se decide caso por caso.

Al final del procedimiento de lazo abierto, se obtiene una señal de salida Θ_o . En las realizaciones ilustradas la señal de salida Θ_o se obtiene como valor de salida del controlador override 140.

Uno o más parámetros de control para el FAO del HRSG se obtienen como una función predeterminada de la señal de salida Θ_o obtenida. Esto incluye por lo menos la señal de demanda de aire Ao , con $Ao = f1(\Theta_o)$ que se emplea para regular el suministro de aire fresco al HRSG 1. En las realizaciones ilustradas Ao se determina como $f1(\Theta_o)$ por medio de la calculadora 210.

En las realizaciones ilustradas, los parámetros de control también incluyen una señal de reciclado de humo Ro , con $Ro = f2(\Theta_o)$ que se emplea para regular el suministro 3 de humo reciclado al HRSG 1. En las realizaciones ilustradas, Ro se determina como $f2(\Theta_o)$ por medio de la calculadora 220.

Según una realización preferida, las funciones predeterminadas $f1$ y $f2$ se adaptan específicamente al HRSG 1 de la CU al cual se aplica el método según la invención. En relación con esto, las funciones $f1$ y $f2$ se determinan experimentalmente en un ensayo en el sitio real, típicamente antes del encargo del HRSG, determinando experimentalmente, para un intervalo de niveles de generación de vapor y los valores correspondientes de señal de salida Θ_o , la combinación óptima de parámetros de control (Ao , Ro , ...) o únicamente el valor óptimo del suministro de aire y por consiguiente de señal de demanda de aire Ao cuando se usa únicamente el suministro de aire fresco al HRSG como parámetro de control para el FAO.

El parámetro de control o la combinación de parámetros de control óptimos se determinan en función del rendimiento energético y teniendo en cuenta cualquier condición de frontera que pueda aplicarse (presión, temperatura, emisiones, etc.).

Los resultados de dichos experimentos de optimización se extrapolan entonces a las funciones predeterminadas: $f1$ y $f2$ en las realizaciones ilustradas. Estas funciones pueden, por ejemplo, adoptar la forma de fórmulas matemáticas o

ES 2 718 406 T3

gráficas que den respectivamente un valor A_o y R_o óptimo para cada valor de señal de salida Θ_o dentro del intervalo de $[\Theta_{min}, \Theta_{max}]$.

5 Empleando respectivamente los valores A_o y R_o correspondientes a la señal de salida Θ_o del procedimiento de lazo abierto obtenida sobre la base de la señal de entrada Θ_i recibida que refleja la demanda instantánea de vapor de la(s) instalación(es) consumidora(s) de vapor, se regula respectivamente el suministro de aire fresco y de humo reciclado al HRSG 1 por medio de una compuerta de aire fresco 7 (sobre la base de A_o) y por medio de una compuerta de recirculación de humo 4 (sobre la base de R_o).

10 En la realización ilustrada en las figuras 4 a 6, el suministro total combinado de aire fresco y humo reciclado se regula además por medio del ventilador con variador 15. Otro parámetro de control X_o para el FAO del HRSG, correspondiente al suministro total de aire fresco y humo reciclado al HRSG 1 durante el FAO, se obtiene como otra función predeterminada f_x de la señal de salida Θ_o de lazo abierto obtenida. $X_o = f_x(\Theta_o)$ se correlaciona de forma natural con los otros dos parámetros de control del procedimiento A_o y F_o y se obtiene por medio de la calculadora 230. La velocidad de variador de velocidad 16 se regula entonces en función del valor de X_o .

15 Se valorará que, a pesar de que en las figuras 3 y 6 las calculadoras 210, 220, 230 se presentan como bloques separados, pueden incorporarse fácilmente en una única unidad de control, en particular en una unidad de control que también incorpore la operación u operaciones del procedimiento de lazo abierto.

Se incluye otra optimización del parámetro de control en las realizaciones ilustradas en las figuras 3 y 6 aguas abajo de las calculadoras 210 y 220.

20 En relación con esto, el HRSG está equipado con un sensor de oxígeno (no presentado) que detecta el contenido de oxígeno C_{oxf} del humo que sale del HRSG 1 (sensor de oxígeno el cual puede estar ubicado, por ejemplo, en la chimenea principal 2).

25 Durante los ensayos en el sitio real empleados para determinar las funciones f_1 , f_2 , ..., se registró también la concentración de oxígeno durante el FAO óptimo del HRSG a diferentes valores de demanda de vapor. Se ha observado de hecho que los cambios en factores extraños, como la temperatura del aire ambiente empleado como aire fresco para el FAO, se reflejan en la concentración de oxígeno del humo.

30 Los correctores 240 comparan la concentración de oxígeno C_{oxf} detectada con la concentración óptima de oxígeno C_{set} registrada correspondiente al valor Θ_o determinado. Cuando C_{oxf} es más alto que un intervalo estrecho predeterminado alrededor de dicho valor C_{set} , los correctores 240 ajustan los valores de A_o y R_o y por consiguiente también las posiciones de las compuertas 4 y 7 de modo que disminuya la relación entre el aire suministrado y el humo reciclado suministrado 3. Cuando C_{oxf} es más bajo que dicho intervalo estrecho predeterminado alrededor del valor C_{set} , los correctores 240 ajustan los valores de R_o y de A_o y por consiguiente también las posiciones de las compuertas 4 y 7 de modo que aumente la relación (aire fresco frente a relación de recirculación) entre el aire suministrado y el humo reciclado suministrado 3.

35 Los valores de A_o y R_o y las posiciones de las compuertas 4 y 7 son ajustados ventajosamente por los correctores 240 sin que esto tenga ningún efecto sobre el suministro total de aire fresco y humo reciclado 3 al HRSG 1 como se determina por medio de las funciones predeterminadas f_1 y f_2 sobre la base de Θ_o .

Leyenda de las figuras 1 a 6

- 1 Generador de vapor de recuperación de calor (HRSG)
- 2 Chimenea principal
- 40 3 Flujo de humo de reciclado
- 4 Compuerta de recirculación de humo
- 5 Ventilador para la recirculación de humo de velocidad fija
- 6 Quemador de conducto de gas natural (estructura de quemador)
- 7 Compuerta de aire fresco
- 45 8 Ventilador de aire fresco de velocidad fija
- 9 Quemador de conducto (estructura de quemador)
- 10 Turbina de gas (GT)
- 11 Flujo de gas de escape de la turbina de gas
- 12 Chimenea bypass

ES 2 718 406 T3

	13	Oxidante de combustión al HRSG 1
	14	Generador de electricidad asociado a la turbina de gas
	15	Ventilador de mezcla de combustión de aire/humo reciclado de velocidad variable
	16	Variador de velocidad (VSD)
5	50	Bloque de procedimiento de lazo abierto
	53	Fuente de combustible
	101	Primer controlador
	102	Válvula de suministro de combustible
	110	Compuerta
10	120	Segundo controlador
	121	Señal de sesgo
	130	Tercer controlador
	140	Controlador override
	210, 220, 230	Calculadora
15	240	Correctores

REIVINDICACIONES

1. Método de control de un suministro de combustible y un suministro de aire a un generador de vapor de recuperación de calor (1) que funciona por aire fresco de una unidad de cogeneración con el fin de satisfacer una demanda instantánea de vapor de una o más instalaciones consumidoras de vapor aguas abajo durante el funcionamiento por aire fresco durante el cual el combustible se combustiona con el aire por medio de una estructura de quemador en el generador de vapor de recuperación de calor (1), generando de este modo calor que se emplea para generar vapor en una estructura de intercambio de calor del generador de vapor de recuperación de calor (1) aguas abajo de la estructura de quemador, comprendiendo el método las operaciones de:
 - 5 a. recibir una señal de entrada Θ_i correspondiente a la demanda instantánea de vapor;
 - b. generar una señal de demanda de combustible F_o como función de la señal de entrada Θ_i y
 - c. regular el suministro de combustible al generador de vapor de recuperación de calor (1) según dicha señal de demanda de combustible F_o ;
 caracterizado por que el método comprende además las operaciones de:
 - 10 d. procesar una señal Θ a partir de la señal de entrada Θ_i hacia una señal de salida Θ_o en un procedimiento de lazo abierto;
 - e. generar una señal de demanda de aire A_o como función de la señal de salida Θ_o ; y
 - f. regular el suministro de aire al generador de vapor de recuperación de calor (1) según dicha señal de demanda de aire A_o ;
 siendo lo cual $A_o = f_1(\Theta_o)$, siendo f_1 una primera función predeterminada.
- 15 2. Método según la reivindicación 1, según el cual la primera función predeterminada f_1 se ha obtenido determinando experimentalmente un valor óptimo de la señal de demanda de aire A_o a diferentes niveles de suministro de vapor por parte del generador de vapor de recuperación de calor (1) durante el funcionamiento por aire fresco.
- 20 3. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, según el cual el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación inicial consistente en amortiguar la señal de entrada Θ_i por medio de un filtro dinámico (110).
- 25 4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, según el cual el generador de vapor de recuperación de calor (1) comprende un sensor de presión que detecta una presión P_f en el generador de vapor de recuperación de calor (1) aguas arriba de la estructura de quemador, según el cual la presión P_f detectada se compara con una presión mínima predeterminada P_{min} y según el cual el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación final consistente en aumentar la señal Θ por medio de un controlador PID (140) si $P_f < P_{min}$.
- 30 5. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, según el cual el generador de vapor de recuperación de calor (1) comprende un sistema de medición de temperatura que determina una primera temperatura del gas T_g^1 entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor, según el cual la primera temperatura del gas T_g^1 determinada se compara con una temperatura máxima predeterminada T_{max} y según el cual el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación final consistente en aumentar la señal Θ por medio de un controlador PID (140) si $T_g^1 > T_{max}$.
- 35 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, según el cual el generador de vapor de recuperación de calor (1) comprende un sistema de medición de temperatura que determina una primera temperatura del gas T_g^1 en el generador de vapor de recuperación de calor (1) entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor y un sensor de presión que detecta una presión P_f aguas arriba de la estructura de quemador, según el cual la primera temperatura del gas T_g^1 determinada se compara con una temperatura máxima predeterminada T_{max} y la presión P_f detectada se compara con una presión mínima predeterminada P_{min} y según el cual el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación final consistente en aumentar la señal Θ por medio de un controlador PID (140) si $T_g^1 > T_{max}$ y/o si $P_f < P_{min}$.
- 40 7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, según el cual el generador de vapor de recuperación de calor (1) comprende un sistema de medición de temperatura que determina una segunda temperatura del gas T_g^2 en el generador de vapor de recuperación de calor (1) entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor y según el cual la segunda temperatura T_g^2 determinada se compara con una temperatura óptima predeterminada T_{opt} y según el cual el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una suboperación consistente en aumentar la señal Θ cuando $T_g^2 > T_{opt}$ y/o disminuir la señal Θ cuando $T_g^2 < T_{opt}$, preferiblemente una suboperación consistente en aumentar la señal Θ cuando $T_g^2 > T_{opt}$ y
- 45 50

disminuir la señal Θ cuando $Tg^2 < T_{opt}$.

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5 y 6, según el cual el sistema de medición de temperatura que determina la primera temperatura del gas Tg^1 determina también una segunda temperatura del gas Tg^2 entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor y según el cual la segunda temperatura Tg^2 se compara con una temperatura óptima predeterminada T_{opt} y según el cual el procedimiento de lazo abierto de la operación d comprende una operación consistente en aumentar la señal Θ cuando $Tg^2 > T_{opt}$ y/o disminuir la señal Θ cuando $Tg^2 < T_{opt}$ antes de la suboperación final del procedimiento de lazo abierto de la operación d, preferiblemente una suboperación consistente en aumentar la señal Θ cuando $Tg^2 > T_{opt}$ y disminuir la señal Θ cuando $Tg^2 < T_{opt}$ antes de la suboperación final del procedimiento de lazo abierto de la operación d.
9. Método según la reivindicación 8, según el cual el sistema de medición de temperatura comprende varios sensores de temperatura entre la estructura de quemador y la estructura de intercambio de calor, según el cual la primera temperatura Tg^1 es la más alta de las temperaturas detectadas por los sensores de temperatura y según el cual la segunda temperatura Tg^2 es el valor medio de la temperatura detectada por los sensores de temperatura.
10. Método según cualquier reivindicación precedente, según el cual el generador de vapor de recuperación de calor (1) comprende además un reciclado de humo.
11. Método según la reivindicación 10, según el cual el método comprende además las operaciones de:
- g. generar una señal de reciclado de humo R_o según una segunda función predeterminada f_2 de la señal de salida Θ_o , $R_o = f_2(\Theta_o)$, y
- h. regular el suministro de humo reciclado (3) al generador de vapor de recuperación de calor (1) según dicha señal de reciclado de humo R_o .
12. Método según la reivindicación 11, según el cual el generador de vapor de recuperación de calor (1) comprende además un sensor de oxígeno que detecta la concentración de oxígeno C_{oxf} en el humo que sale del generador de vapor de recuperación de calor (1), según el cual el método comprende además la operación de:
- i. comparar la concentración de oxígeno C_{oxf} detectada con un valor objetivo de humo oxígeno C_{set} , y
- j. ajustar la señal de demanda de aire A_o y/o la señal de reciclado de humo R_o , aguas arriba de las respectivas operaciones f y h de regulación del suministro de aire y el suministro de humo reciclado (3), de modo que aumente la proporción entre el aire suministrado y el humo reciclado (3) cuando $C_{oxf} < C_{set}$ y de modo que disminuya la proporción entre el aire suministrado y el humo reciclado (3) cuando $C_{oxf} > C_{set}$.
13. Método según la reivindicación 12, según el cual el ajuste de la señal de demanda de aire A_o y/o de la señal de reciclado de humo R_o en la operación j se maneja de modo que la cantidad total de aire y de humo reciclado (3) al generador de vapor de recuperación de calor (1), expresada en Nm^3/h , permanezca substancialmente constante.
14. Método según la reivindicación 12 o 13 según el cual la operación consistente en ajustar la señal de demanda de aire A_o y/o la señal de reciclado de humo R_o en la operación j se maneja en un procedimiento de lazo cerrado.
15. Método según cualquier reivindicación precedente, según el cual el HRSG comprende un precalentador de aire fresco y según el cual la temperatura a la cual se precalienta el aire en el precalentador de aire fresco antes de suministrarse al HRSG se regula según una señal de temperatura del aire T_a , según lo cual $T_a = f_3(\Theta_o)$, siendo f_3 una tercera función predeterminada.

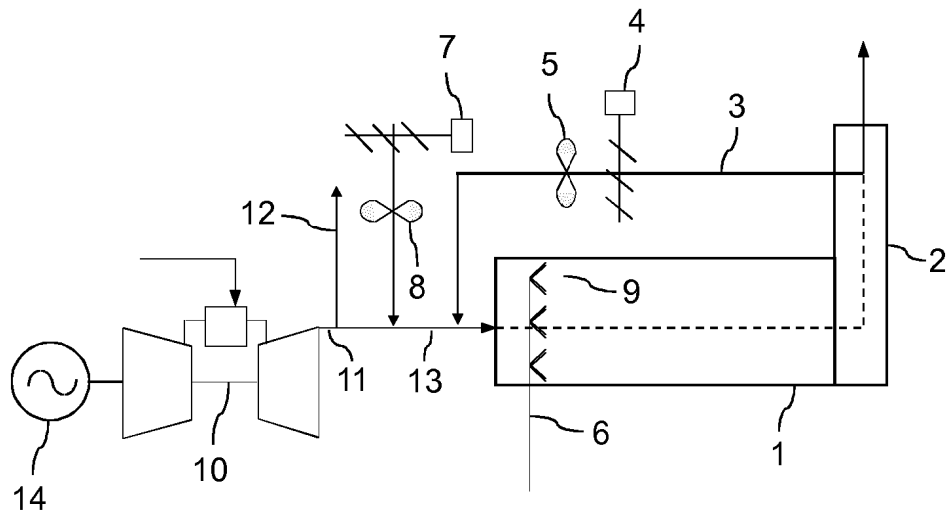


Fig. 1

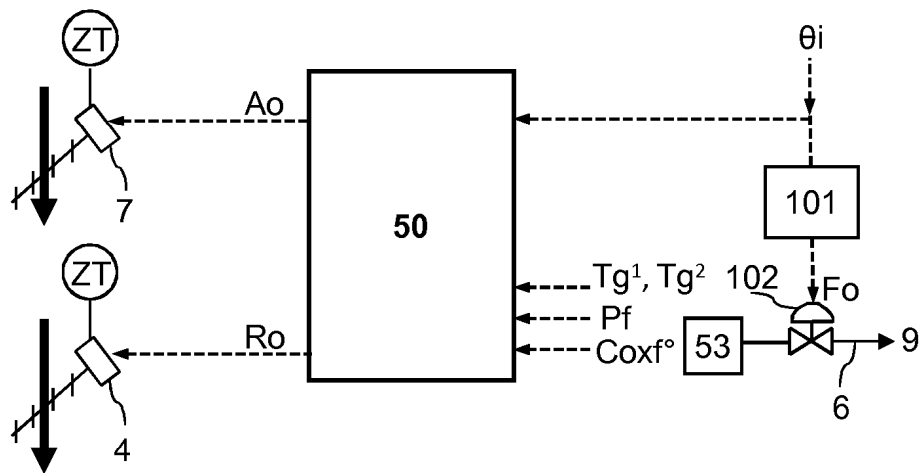


Fig. 2

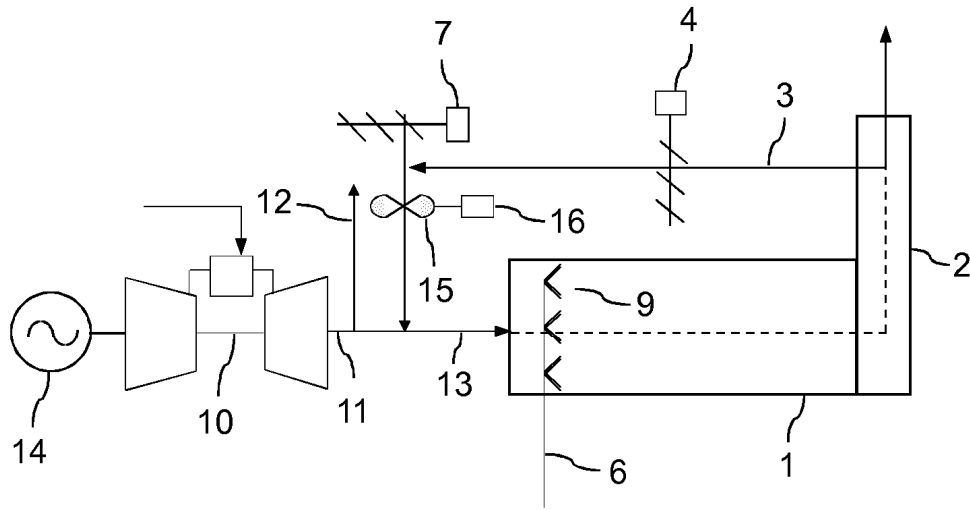
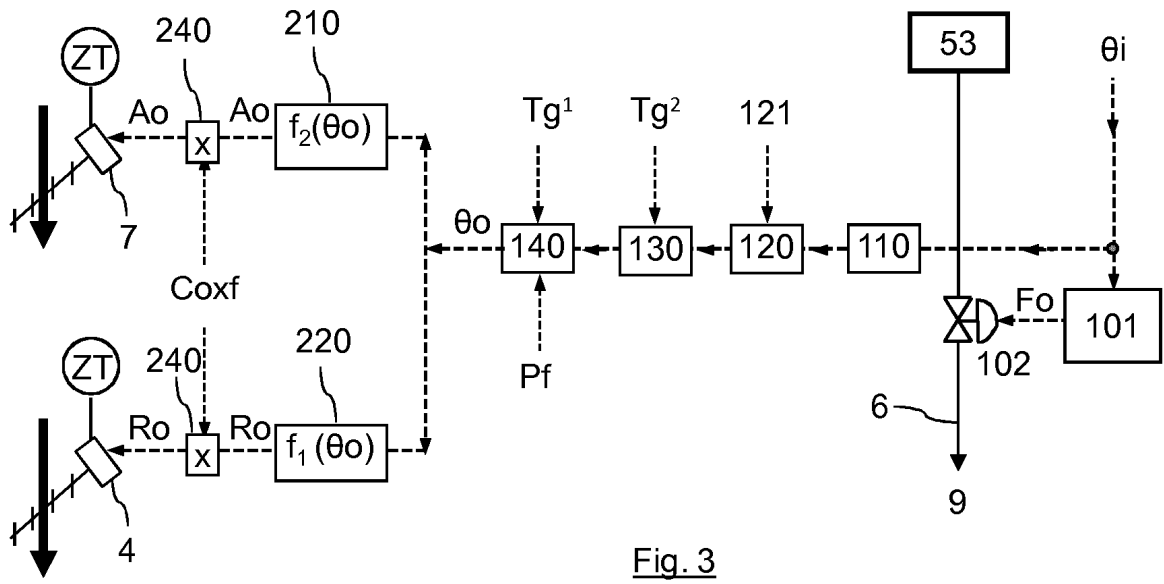


Fig. 4

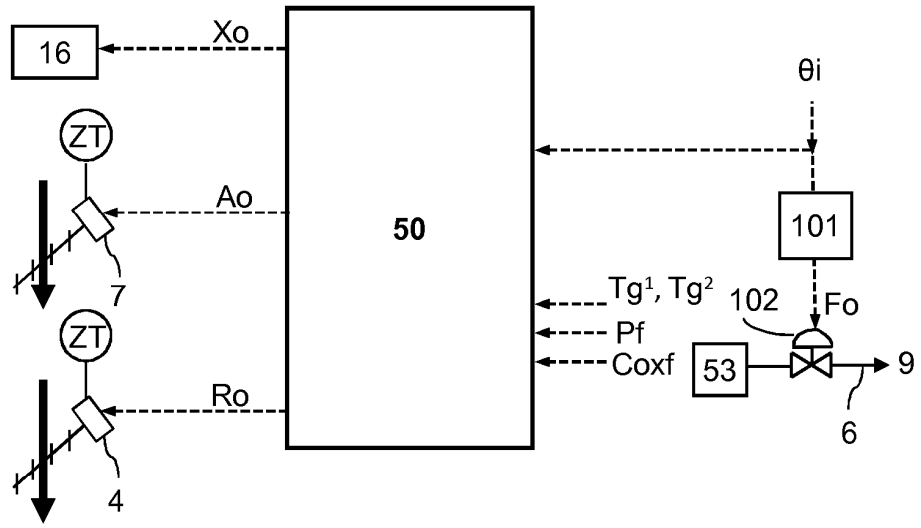


Fig. 5

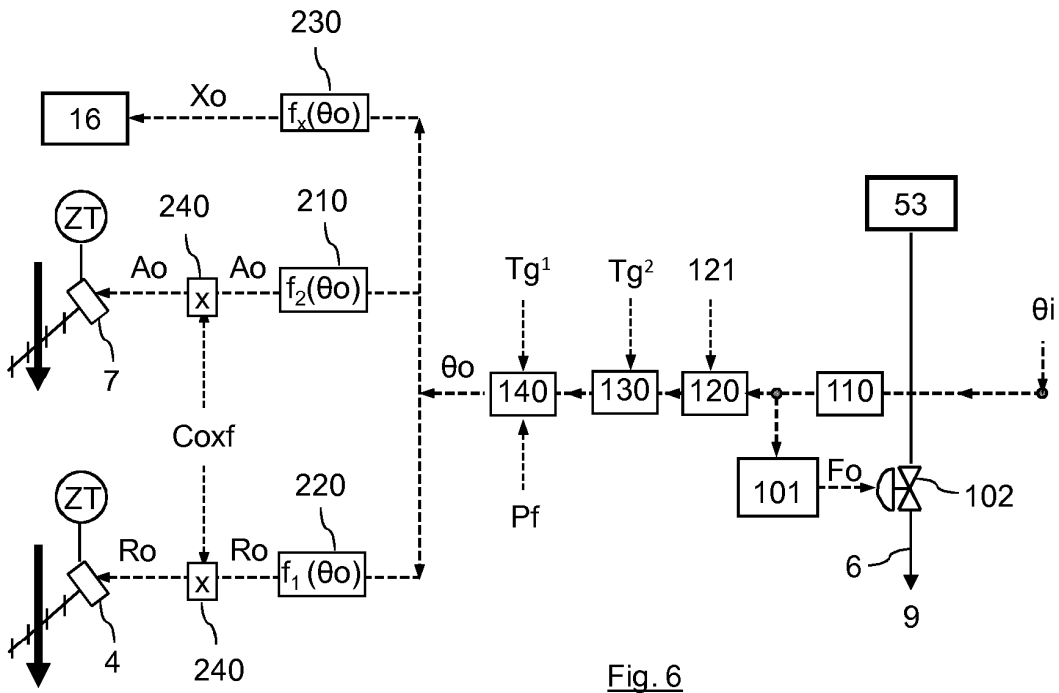


Fig. 6