



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 321 872**

51 Int. Cl.:
F04D 27/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06707973 .1**

96 Fecha de presentación : **02.02.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1846660**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **24.10.2007**

54 Título: **Procedimiento para optimizar el funcionamiento de varios grupos compresores y dispositivo para ello.**

30 Prioridad: **11.02.2005 DE 10 2005 006 410**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
12.06.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
12.06.2009

73 Titular/es: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
Wittelsbacherplatz 2
80333 München, DE**

72 Inventor/es: **Metzger, Michael y
Liepold, Helmut**

74 Agente: **Zuazo Araluze, Alexander**

ES 2 321 872 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).

ES 2 321 872 T3

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para optimizar el funcionamiento de varios grupos compresores y dispositivo para ello.

5 La invención se refiere a un procedimiento para el control de una instalación de compresores con al menos dos grupos compresores que pueden conectarse y/o desconectarse por separado y con un conjunto de dispositivos para modificar la potencia de trabajo de los grupos compresores.

10 Además, se refiere la invención a un equipo de control para controlar una instalación de compresores con al menos dos grupos compresores que pueden conectarse y/o desconectarse por separado y con un conjunto de dispositivos para modificar la potencia de trabajo de los grupos compresores.

15 Las instalaciones compresoras, por ejemplo instalaciones compresoras de gas natural para el transporte de gas y/o el almacenamiento de gas, son equipos esenciales en cuanto al abastecimiento de energía nacional e internacional. Un sistema para transporte de gas está compuesto por un conjunto de instalaciones compresoras que pueden estar compuestas en cada caso por varios grupos compresores. Los grupos compresores tienen aquí la tarea de aportar a un medio a transportar energía mecánica suficiente para compensar las pérdidas por rozamiento y asegurar las presiones y flujos de servicio exigidos. Los grupos compresores presentan a menudo accionamientos y rodets muy diferentes, ya que los mismos están diseñados por ejemplo para un funcionamiento con carga de base o un funcionamiento con carga de punta. Un grupo compresor incluye por ejemplo al menos un accionamiento y al menos un compresor.

20 La automatización de las instalaciones tiene una gran importancia, especialmente para lograr un funcionamiento optimizado en cuanto a costes. La capacidad de la automatización de la instalación de conducir el proceso y la instalación compresora dentro de los imperativos de la producción, aporta ventajas económicas decisivas.

25 A menudo son accionados los compresores de una instalación compresora mediante turbinas, que cubren sus necesidades de combustible directamente desde una pipeline (tubería de suministro). Como alternativa, los compresores son accionados mediante motores eléctricos. Una forma de funcionamiento optimizado en costes significa que se minimiza el consumo de energía de las turbinas o bien de los accionamientos eléctricos para una potencia de compresión dada, una potencia de transporte, una capacidad de transporte y/o un caudal dado.

30 La gama de funcionamiento útil de los compresores viene limitada por repercusiones desventajosas de los procesos internos del flujo. De ello resultan límites para el funcionamiento, como por ejemplo una limitación de la temperatura, sobrepasar la velocidad del sonido local (choque de compresión, límite de aspiración), el desprendimiento circulante del flujo en el rodete de álabes o el límite de succión.

35 La automatización de una instalación compresora tiene primariamente la tarea de realizar los valores de consigna prescritos por una central de dispatching o despacho de control como, a elección, un caudal de paso a través de la estación o una presión final en el lado de salida como valores reales. Al respecto no deben sobrepasarse valores límite predeterminados para las presiones de aspiración en el lado de entrada, las presiones finales en el lado de salida y la temperatura final a la salida de la instalación.

40 Por el documento WO 03/036096 A1 se conoce un procedimiento para optimizar el funcionamiento de varios grupos compresores de una instalación compresora de gas natural. En este procedimiento, tras el arranque de un segundo o bien de otro grupo compresor, se funciona con una velocidad de giro de los grupos compresores ya en marcha que se encuentra en una relación fija de velocidad de giro con respecto a los datos del campo característico archivados para cada grupo compresor. Para realizar una primera reducción del consumo de energía, se modifican tras arrancar un compresor adicional las velocidades de giro de todos los grupos que se encuentran ya en servicio mediante un ajuste en la misma proporción de los caudales hasta que, si es posible, todas las válvulas de prevención de succión de la instalación estén cerradas. Sólo después de que todas las válvulas de prevención de succión estén cerradas, se deslizan los puntos de trabajo de los grupos compresores en sus campos característicos hasta tan próximo como sea posible de una línea del máximo rendimiento.

45 Según el documento EP 0 769 624 B1 se conoce un procedimiento para la compensación de cargas entre varios compresores y para manipular la potencia de trabajo de los compresores, para mantener una relación predeterminada entre todos los compresores cuando los puntos de trabajo de todos los compresores están más alejados del límite de succión de lo que indica un valor específico.

50 Por el documento EP 0 576 238 D1, se conoce un procedimiento y un dispositivo para la distribución de la carga. Con un compresor designado como compresor-guía se genera una señal de regulación que se utiliza como magnitud de referencia para un compresor que no es guía.

55 Los procedimientos antes descritos no pueden reducir aún el consumo de energía de toda la instalación compresora de manera satisfactoria.

60 La invención tiene como tarea básica poner a disposición un procedimiento y un dispositivo para seguir optimizando el consumo de energía para un funcionamiento de varios grupos compresores de una instalación compresora.

ES 2 321 872 T3

Esta tarea se resuelve en el marco de la invención calculándose, cuando se prescriben nuevos valores de consigna o se modifica el estado actual de la instalación compresora, mediante un cálculo de optimización a partir de una configuración de conexión actual de los grupos compresores en cuanto a un consumo optimizado de energía total de la instalación compresora, una nueva configuración de conexión y ajustándose la nueva configuración de conexión automáticamente a través del equipo de control.

Es ventajoso en la invención que la optimización pueda basarse en todos los grupos compresores disponibles o listos para el servicio en la correspondiente instalación compresora, independientemente de su correspondiente estado de funcionamiento o conexión. En particular permite la invención - contrariamente a los controles conocidos para instalaciones compresoras - que el resultado de la optimización sea una conexión automática de un grupo compresor que antes encontraba fuera de servicio o la desconexión completa de un grupo compresor.

Automáticamente significa aquí en particular “online”, es decir, automáticamente puede significar por ejemplo que la configuración de conexión se utiliza sin intervención manual del personal de servicio de la instalación compresora, preferiblemente en tiempo real. Tiempo real significa que el resultado de un cálculo está disponible con garantías dentro de un determinado espacio de tiempo, es decir, antes de que se alcance un determinado límite de tiempo. Al respecto puede correr el cálculo de optimización en una instalación de procesamiento de datos separada, que retransmite automáticamente sus datos de cálculo al equipo de control.

La invención parte del concepto secuencial conocido, es decir, tras el arranque de un grupo adicional, prescrito desde el exterior, se cierran primeramente las válvulas de prevención de succión y a continuación se optimizan los puntos de trabajo de los grupos compresores en cuanto a su rendimiento. En el marco de la invención se considera preferiblemente durante cada cálculo de optimización la instalación compresora completa y se calcula la configuración de conexión de la instalación compresora, es decir, la prescripción de un estado de conexión de los distintos grupos compresores. El cierre de las o de todas las válvulas de prevención de succión puede asegurarse mediante un caudal mínimo a través de los grupos compresores cuando se realiza la optimización. También puede realizarse un primer arranque de la instalación compresora ya con una configuración de conexión favorable en cuanto a un consumo total de energía optimizado.

Bajo la configuración de conexión de una instalación compresora, preferiblemente manipulable eléctricamente, se entiende un conjunto de los correspondientes estados de conexión de los distintos grupos compresores. La configuración de conexión viene representada por los estados de conexión “0” para desconectado y “1” para conectado, que por ejemplo está archivada por bits en una variable de números enteros.

Bajo proceso de conexión se entiende el cambio de un estado de conexión, en particular eléctrico, a otro.

Ventajosamente se calcula un pronóstico mediante el cálculo de optimización para al menos un instante, preferiblemente para varios instantes futuros. Puesto que el procedimiento permite pronósticos hasta un instante determinado, es posible utilizar conocimientos sobre una forma de funcionamiento normal de la estación, es decir, por ejemplo una evolución de la carga usual, para minimizar la frecuencia de maniobra de los grupos compresores.

Es conveniente que se evalúen bloques de datos específicos para cada grupo compresor y/o campos característicos específicos para cada grupo compresor y que se determinen para los distintos grupos compresores puntos de trabajo que dependen de valores predeterminados o bien modificados del flujo másico y de un trabajo de transporte específico, ajustándose los puntos de trabajo tal que se optimiza el consumo total de energía de la instalación compresora.

Ventajosamente se dan los bloques de datos y/o campos característicos como función de un flujo másico y de un trabajo de transporte específico de los distintos grupos compresores.

Ventajosamente se calcula, y dado el caso se modifica en el cálculo de optimización, adicionalmente a la configuración de conexión, una distribución de carga, es decir, una relación de velocidades de giro entre los grupos compresores.

Otra ventaja esencial reside en que pueden tenerse en cuenta condiciones marginales en la optimización, como por ejemplo no transgredir el límite de succión, ya en un cálculo optimizado en cuanto a rendimiento de los valores de consigna para la velocidad de giro relativos a las distintas estaciones compresoras.

Es conveniente que el cálculo de optimización se realice con un ciclo de regulación, en particular autoactivado.

Ventajosamente se ponen a disposición como magnitudes de salida del cálculo de optimización con cada ciclo de regulación valores de consigna de la velocidad de giro y/o la nueva configuración de conexión para el equipo de control.

Es conveniente que mientras dura el ciclo de regulación, que en particular es un múltiplo del tiempo que dura el ciclo de una regulación del equipo de control, los valores de consigna de la velocidad de giro y/o la configuración de conexión se mantengan constantes.

En una configuración especial mejorada de la invención se realiza una escalación de los valores de consigna de la velocidad de giro con un factor común y se utilizan como valor de consigna para un regulador de un grupo compresor.

ES 2 321 872 T3

Un aumento adicional de la efectividad del funcionamiento de la instalación se logra activando el equipo de control con la nueva configuración de conexión ya antes de terminar el ciclo de regulación una fase de calentamiento de los grupos compresores para conectar posteriormente un grupo compresor que antes se encontraba fuera de servicio.

5 En una forma constructiva especial se comunica al terminar la fase de calentamiento al equipo de control la disponibilidad para la carga para el siguiente ciclo de regulación. Cuando por ejemplo la velocidad de giro de un grupo compresor que arranca es suficientemente alta y la fase de calentamiento de la turbina ha terminado, se activa una señal "preparado para la carga". Esto significa que el grupo compresor toma parte en el proceso de la distribución de la carga y que se tendrá en cuenta en el cálculo de optimización para la distribución de carga más favorable entre los
10 que se encuentran en servicio.

En otra forma constructiva preferente, se evalúan como entradas para el cálculo de optimización

- 15 - un modelo de los distintos grupos compresores y/o
- una biblioteca de modelos de la instalación compresora completa y/o
- un trabajo de transporte actual específico de los distintos grupos compresores y/o
- 20 - un trabajo de transporte actual específico de la instalación compresora y/o
- un flujo másico actual a través de cada grupo compresor, en particular a través de un compresor individual y/o
- 25 - un flujo másico actual a través de la instalación compresora y/o
- la configuración de conexión actual y/o
- una presión de aspiración en el lado de entrada de la instalación compresora y/o
- 30 - una presión de aspiración en el lado de entrada del grupo compresor individual y/o
- una presión final en el lado de salida de la instalación compresora y/o
- 35 - una presión final en el lado de salida del grupo compresor individual y/o
- una temperatura en el lado de salida de la instalación compresora y/o
- 40 - una temperatura en el lado de entrada de la instalación compresora y/o
- una temperatura en el lado de salida de los grupos compresores individuales y/o
- una temperatura en el lado de entrada de los grupos compresores individuales y/o
- 45 - las velocidades de giro actuales de los grupos compresores individuales.

De manera conveniente, minimiza el cálculo de optimización según el principio de la regulación predictiva del modelo mediante cálculos de pronósticos el consumo de energía total esperado hasta un instante posterior.

50 En otra forma constructiva preferente, se tiene en cuenta en el cálculo de optimización el consumo de energía de un proceso de conexión.

De manera conveniente, se calcula el consumo de energía del proceso de conexión a partir de los bloques de datos y/o de los campos característicos de los grupos compresores. El conocimiento de la proporción del consumo de energía para el proceso de conexión permite una determinación más exacta aún del consumo total de energía mínimo de la instalación compresora.

60 Una variante ventajosa de la invención es que el trabajo del transporte específico de la instalación compresora para el ciclo de regulación se suponga constante, en particular cuando están conectados los grupos compresores en paralelo.

Una variante alternativa ventajosa de la invención es que el flujo másico de la instalación compresora para el ciclo de regulación se suponga constante, en particular cuando los grupos compresores están conectados en serie.

65 De manera conveniente funciona un grupo compresor activo al menos con un caudal que puede determinarse o un caudal mínimo que puede determinarse.

ES 2 321 872 T3

Ventajosamente se realiza el cálculo de optimización mediante un algoritmo Branch-and-Bound (de ramificación y acotación).

En otra forma ventajosa, se determina un límite para el algoritmo Branch-and-Bound mediante la resolución de un problema simplificado por medio de un Sequential-Quadratic-Programming (programación cuadrática secuencial).

Se logra un aumento adicional de la eficiencia del procedimiento de cálculo solucionando problemas parciales el cálculo de optimización mediante una programación dinámica, en particular cuando se trata de una conexión en serie.

La tarea referida del dispositivo se resuelve con referencia al equipo de control citado el principio mediante un modelo de optimización con el que, prescribiendo nuevos valores de consigna o modificando el estado actual de la instalación compresora mediante un cálculo de optimización a partir de una configuración de conexión actual de los grupos compresores en cuanto a un consumo de energía total optimizado de la instalación compresora, puede calcularse una nueva configuración de conexión y mediante un módulo de ajuste mediante el que puede ajustarse automáticamente la nueva configuración de conexión.

El módulo de optimización para optimizar el consumo de energía está orientado especialmente para, en combinación con el equipo de control y/o la central del dispatching, distribuir la carga total determinada previamente entre los distintos grupos compresores tal que los valores prescritos para la estación se realicen bajo un consumo de energía lo menor posible, es decir, con el máximo grado de rendimiento total. Esto incluye por ejemplo tanto la decisión de qué grupos compresores se conectarán a activo y cuáles a inactivo, como también la prescripción de cuál ha de ser la contribución de cada grupo activo a la potencia total, es decir, la prescripción de la distribución de la carga.

En una forma constructiva especial de la invención, está dispuesto el módulo de optimización espacialmente alejado, en particular varios kilómetros, del equipo de control.

Según una configuración conveniente, está orientado el módulo de optimización a tener en cuenta el consumo de energía de un proceso de conexión.

Otra configuración mejorada consiste en que el módulo de optimización esté orientado al cálculo de optimización para un conjunto de equipos de control de varias instalaciones compresoras.

También pertenece a la invención un producto de programa de ordenador que contiene un software para realizar un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 21. Con un código de programa legible por máquina sobre un soporte de datos, pueden orientarse ventajosamente instalaciones de procesamiento de datos a un módulo de optimización.

A continuación se describirá más en detalle la invención según un ejemplo de ejecución, mostrándose en

figura 1 un esquema de bloque de circuitos de un procedimiento para optimizar el funcionamiento de una instalación compresora,

figura 2 un campo característico específico del compresor de un grupo compresor,

figura 3 un equipo de control para controlar una instalación compresora y en

figura 4 un diagrama secuencial de las etapas del procedimiento.

El comportamiento de un único grupo compresor 3, 4, 5 se modela mediante un campo característico 20, describiendo el campo característico 20 su rendimiento y su velocidad de giro como función de su punto de trabajo 22. El punto de trabajo 22 se describe mediante una variable de estado m que describe un flujo másico a través del grupo compresor, y un trabajo de transporte específico que puede determinarse mediante la ecuación 1

$$y = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_E Z \left[\left(p_A / p_E \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] + \frac{c_A^2 - c_E^2}{2} + g \cdot (z_A - z_E) \quad [G1.1]$$

siendo

R una constante específica del gas,

k un exponente isentrópico,

Z un factor del gas real,

ES 2 321 872 T3

C_E, C_A una velocidad a la entrada o bien a la salida del grupo compresor,

z_A, z_E una diferencia de alturas,

5 P_E una presión de aspiración,

P_A una presión final y

T_E una temperatura de entrada.

10

Los campos característicos 20 no se ponen a disposición mediante una fórmula cerrada. A partir de una medición se calcula una curva característica de transporte 21 y una curva característica de rendimiento 23. Para una velocidad de giro constante se determina la relación entre el trabajo de transporte y un rendimiento η_i del flujo volumétrico (\dot{V}_i) o del flujo másico \dot{m} en puntos de apoyo.

15

Para modelizar el comportamiento de un grupo compresor 3, 4, 5, deben tomarse adicionalmente los límites de funcionamiento, como por ejemplo un límite de succión 36, que vienen determinados por la presencia de determinados fenómenos de flujo en el compresor, en función de la velocidad de giro. A partir de estos puntos de apoyo y de los correspondientes valores para distintas velocidades de giro, pueden establecerse mediante principios adecuados, como por ejemplo interpolación polinómica elemento a elemento o bien splines B, los campos característicos 20 como función del flujo másico \dot{m}_i y del trabajo de transporte específico y_i y su campo de definición.

20

Cuando los grupos compresores 3, 4, 5 están conectados en serie, se distribuye todo el trabajo de transporte entre los distintos grupos compresores 3, 4, 5 de manera óptima en cuanto a energía, suponiéndose que el flujo másico a través de los compresores es el mismo. Para una formulación de un problema de minimización, en particular cuando se trata de una conexión serie, rige la ecuación 2:

25

30

$$\min = \sum_{i \geq 0} \sum_{i=1}^N s_{i,t} \frac{y_{i,t} \dot{m}_{g,t}}{\eta_i(\dot{m}_{g,t}, y_{i,t})} + \delta \sum_{i > 0} (s_{i,t} - s_{i,t-1})^2 \quad [G1.2]$$

35

Para utilizar una programación matemática, se considera la ecuación 3 como condición secundaria de la ecuación:

40

- la conexión serie da como resultado que la suma de los trabajos específicos de transporte de los compresores ha de ser igual en todo momento al trabajo de transporte de la estación:

45

$$y_{g,t} = \sum_{i=1}^N y_{i,t}, \quad s_{i,t} y_{i,t}^{\min}(\dot{m}_{g,t}) \leq y_{i,t} \leq s_{i,t} y_{i,t}^{\max}(\dot{m}_{g,t}) \quad [G1.3]$$

50

Cuando están conectados en paralelo los compresores, ha de distribuirse el flujo total entre los distintos grupos compresores 3, 4, 5, tomándose como determinado ya previamente el trabajo del transporte específico de la instalación compresora para un ciclo de optimización R. Para una formulación de un problema de minimización, en particular cuando se trata de una conexión en serie, rige la ecuación 4:

55

$$\min = \sum_{i \geq 0} \sum_{i=1}^N s_{i,t} \frac{y_{g,t} \dot{m}_{i,t}}{\eta_i(\dot{m}_{i,t}, y_{g,t})} + \delta \sum_{i > 0} (s_{i,t} - s_{i,t-1})^2 \quad [G1.4]$$

65

ES 2 321 872 T3

Para utilizar una programación matemática, se considera la ecuación 5 como condición secundaria de la ecuación:

- en el caso de la conexión paralelo, ha de ser igual la suma de los flujos individuales en cada instante al flujo total exigido:

$$\dot{m}_{g,t} = \sum_{i=1}^N \dot{m}_{i,t} , \quad s_{i,t} \dot{m}_{i,t}^{\min} (y_{g,t}) \leq \dot{m}_{i,t} \leq s_{i,t} \dot{m}_{i,t}^{\max} (y_{g,t}) \quad [G1.5]$$

Puesto que ha de minimizarse el consumo de energía, resulta el problema de minimización como suma del consumo de todos los grupos compresores 3, 4, 5.

Otro término adicional está combinado adicionalmente con el problema de minimización, que representa una función objetivo. Los costes de la conexión, es decir, el consumo energético de un proceso de conexión, se tiene en cuenta de esta manera. Para una presión de aspiración dada P_S , una presión final P_E , una temperatura T y el flujo másico, \dot{m} puede calcularse la parte proporcional del consumo de energía para un proceso de conexión de un grupo compresor 3, 4, 5 a partir de los campos característicos.

Cuando se optimiza la función objetivo, han de observarse las siguientes condiciones secundarias de desigualdad:

- Un grupo compresor activo debe mantener un caudal mínimo, para no infringir el límite de succión, en particular flujo másico mínimo $\dot{m}_{i,t}^{\min}$. Este caudal mínimo depende del trabajo de transporte instantáneo de la instalación compresora. Igualmente debe permanecer el flujo másico por debajo de un valor máximo admisible $\dot{m}_{i,t}^{\max}$.
- De manera totalmente análoga al flujo másico, rigen en el caso de compresores conectados en serie límites superiores e inferiores para el trabajo de transporte específico $y_{i,t}^{\min}$ e $y_{i,t}^{\max}$.

El tratamiento de instalaciones compresoras con grupos conectados en paralelo y en serie, se realiza unificadamente y no exige fórmulas totalmente diferentes del problema de minimización. Una solución resulta directamente a partir de la formulación matemática como problema de optimización.

La figura 1 muestra un esquema de bloques de circuitos de un procedimiento para optimizar el funcionamiento de una instalación compresora. La instalación compresora está representada con tres grupos compresores 3, 4 y 5 muy esquematizados. Respecto a la conexión de los grupos compresores 3, 4 y 5, se supone que la conexión es en paralelo. Los grupos compresores 3, 4 y 5 son controlados y regulados mediante un equipo de control 10. El equipo de control 10 incluye una regulación del equipo de control 12, un primer regulador del grupo compresor 13, un segundo regulador del grupo compresor 14 y un tercer regulador del grupo compresor 15. Un módulo de optimización 11 se encuentra unido bidireccionalmente con el equipo de control 10. Mediante el módulo de optimización 11 se resuelve un problema de optimización no lineal mixto de números enteros. Una formulación matemática del problema de optimización está implementada en el módulo de optimización 11. Utilizando la ecuación 4 con una cantidad $N = 3$ de los grupos compresores 3, 4 y 5 y una serie de magnitudes de entrada 33, pone el módulo de optimización 11 para lograr un consumo de energía total optimizado, magnitudes de salida 32 optimizadas a disposición de la regulación del equipo de control 12. Las magnitudes de entrada 33 se componen a partir de una biblioteca de modelos 26, con un modelo 24a, 24b, 24c para cada grupo compresor 3, 4, 5 y magnitudes del proceso de la instalación compresora.

Mediante valores reales 30 y valores de consigna 31, se alimenta la regulación del equipo de control 12 con

- una temperatura actual $T_{g,A}$ en el lado de salida de la instalación compresora,
- una temperatura actual $T_{g,E}$ en el lado de entrada de la instalación compresora,
- una presión final actual $P_{g,A}$ en el lado de salida de la instalación compresora,
- una presión de aspiración actual $P_{g,E}$ en el lado de entrada de la instalación compresora,
- un flujo volumétrico actual V_i para $i = 1 \dots 3$ con en cada caso una temperatura actual para la entrada $T_{i,E}$ y la salida de un grupo compresor $T_{i,A}$,
- una presión actual $P_{i,E}$ y $P_{i,A}$

de los distintos grupos compresores 3, 4 y 5 como valores reales 30.

ES 2 321 872 T3

Los valores de consigna o bien valores límite 31 para la regulación del equipo de control 12 están compuestos por una temperatura máxima $T_{g,A,max}$, una presión $P_{g,A,(soll)}$ (valor de consigna) y un caudal $\dot{V}_{g(soll)}$ (valor de consigna) en el lado de salida de la instalación compresora, así como una presión de aspiración máxima $P_{g,E(max)}$ o bien $P_{g,A,max}$ en el lado de entrada y en el lado de salida respectivamente de la instalación compresora.

Con los valores reales 30 como magnitudes de proceso y la ecuación básica Gl.1, se completan las magnitudes de entrada 33 para el módulo de optimización 11.

En el módulo de optimización 11 se calcula ahora un consumo total de energía mínimo. Para los grupos compresores 3, 4 y 5 dispuestos en paralelo, se resuelve el problema de la minimización mediante un algoritmo Branch-and-Bound (L.A. Wolsey "Integer Programming" (programación con números enteros), John Wiley & Sons, Nueva York, 1998), que maneja variables discretas en un árbol binario. Para no tener que evaluar todas las derivaciones del árbol de búsqueda binario, se determina un límite inferior G para el mínimo mediante la solución de un problema simplificado por medio de la programación cuadrática secuencial (P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright, "Optimización práctica", Academic Press, Londres, 1995).

En el módulo de optimización 11 se implementan además clases de problemas especiales y formulaciones de problemas adaptadas, así como algoritmos eficientes, tal como pueden encontrarse en la siguiente literatura

T. Jenicek, J. Kralik, "Control optimizado de estaciones compresoras generalizadas";

S. Wright, M. Somani, C. Ditzel, "Optimización de estaciones compresoras", Grupo de Interés de Simulación de Tuberías de Suministro, Denver, Colorado, 1998;

K. Erhardt, M.C. Steinbach, "Optimización no lineal en redes de gas", ZIB-Report 03-46, Berlín, 2003 y

R.G. Carter, "Optimización de estaciones compresoras: Precisión y velocidad computacional", 1996.

Partiendo de una forma de marcha continua de la instalación compresora, se mantienen puntos de trabajo 22 en campos característicos 20 (ver figura 2) de los grupos compresores 3, 4 y 5 en su zona óptima.

Cuando varía el caudal $\dot{V}_{g(soll)}$ de la instalación compresora, se calcula mediante un cálculo de optimización en el módulo de optimización 11 a partir de una configuración de conexión actual $S_{i,t-1}$ de los grupos compresores 3, 4 y 5, en cuanto a un consumo total de energía optimizado de la instalación compresora, una nueva configuración de conexión $S_{i,t}$.

Una reducción del caudal $\dot{V}_{g(soll)}$ de la instalación compresora a la mitad tiene como consecuencia un resultado del cálculo de optimización que prescribe la siguiente nueva configuración de conexión: El grupo compresor 5 reduce su marcha mediante la prescripción de $S_{5,t} = 0$. Puesto que el caudal exigido por la instalación compresora puede alcanzarse sin más con dos de los tres grupos compresores, se conecta el grupo compresor 5 a inactivo. Todos los grupos compresores 3 y 4 que se encuentran en servicio son mantenidos en marcha continuamente ahora hasta que una modificación del caudal o una desviación de los valores de consigna dé como resultado un nuevo cálculo de optimización con una configuración de conexión modificada. Mantenido en marcha continuamente significa que los grupos compresores que se encuentran en servicio funcionan con una distribución de carga optimizada y con un ajuste optimizado de sus puntos de trabajo 22 en los campos característicos 20. Las magnitudes de salida 32 del módulo de optimización 11 contienen así, además de los estados de conexión a ajustar en ese instante para los grupos compresores, también una prescripción de valor de consigna de la velocidad de giro λ_i para los distintos grupos compresores 3, 4 y 5.

Mediante la regulación de la estación, que está subordinada, y que corre con un ciclo más rápido que la optimización, son escalados los valores de consigna de la velocidad de giro λ_i , antes de transmitirse los mismos a los reguladores de los grupos compresores, con un factor común α , para regular hasta los valores de consigna. El cálculo de optimización se realiza autoactivado con un ciclo de regulación R en el módulo de optimización 11. En el cálculo de optimización se realizan por lo tanto cíclicamente, además del cálculo de una eventual configuración de conexión $S_{i,t-1}$, la distribución de la carga entre los grupos compresores, es decir, los valores de consigna de la velocidad de giro λ_i óptimos para el rendimiento de los distintos grupos compresores 3, 4 y 5. Mientras dura el ciclo de regulación R, se mantienen constantes los valores de consigna de la velocidad de giro λ_i y la configuración de conexión $S_{i,t}$. Si ahora se duplica el caudal $\dot{V}_{g(soll)}$ de la instalación completa debido a variaciones de la carga, entonces el cálculo de optimización con el siguiente ciclo de regulación R prescribirá una nueva configuración de conexión $S_{i,t}$, una nueva distribución de la carga y una nueva posición de los puntos de trabajo 22 óptimos en cuanto a rendimiento.

La nueva configuración de conexión significa ahora que funcionen tres de los tres grupos compresores. Puesto que el resultado del cálculo de optimización se conoce todavía antes de terminar el ciclo de regulación, se inicia para el tercer grupo compresor 5 a arrancar una fase de calentamiento. Al finalizar el ciclo de regulación R, se ponen a disposición los nuevos valores para el equipo de control 10 y en particular para los reguladores de los grupos compresores 13, 14, 15. El grupo compresor 5, preparado previamente con una fase de calentamiento, puede ahora

ES 2 321 872 T3

conectarse sin discontinuidad para el nuevo ciclo de regulación R y resulta de nuevo un consumo total de energía óptimo para la potencia de transporte exigida o el caudal $\dot{V}_{g(soll)}$ exigido.

5 La figura 2 muestra un campo característico 20 específico del compresor para un grupo compresor 3. El campo característico del compresor 20 muestra las curvas características de transporte 21 que dependen de la velocidad de giro y las curvas características de rendimiento 23 del compresor en función del caudal $\dot{V}_{3,E}$ registrado sobre el eje x a la entrada del compresor y del trabajo de transporte específico y_3 del compresor ($\dot{V}=\dot{m}/\delta$, δ = densidad) registrado sobre el eje y.

10 Adicionalmente se registra un límite de succión 36. Los puntos de trabajo 22 óptimos en cuanto a rendimiento se encuentran próximos al límite de succión 36 sobre una curva característica de rendimiento 23 con un elevado rendimiento $\eta_{3,max}$. Para el procedimiento descrito en la figura 1 se indican los campos característicos 20 como función matemática de un flujo másico (o de un caudal) y de un trabajo de transporte específico de los distintos grupos compresores. La formulación matemática de los campos característicos 20 como función de cálculo es parte integrante del
15 módulo de optimización 11 o bien del cálculo de optimización.

La figura 3 muestra un equipo de control 10 para el control de una instalación compresora 1. Los valores de consigna de la velocidad de giro óptimos λ_i calculados mediante el módulo de optimización 11 y la nueva configuración de conexión $S_{i,t}$, que interactúa con el equipo de control 10, son ajustados y/o regulados mediante un módulo de ajuste
20 S en los grupos compresores 3, 4 y 5.

Como magnitud de regulación para una regulación del equipo de control 10, se utiliza en particular aquella magnitud de entre el caudal, la presión de aspiración, la presión final y la temperatura final que presenta la mínima desviación de regulación positiva. La regulación del equipo de control 10 aporta como salida, juntamente con el módulo de optimización, los valores de consigna para los distintos reguladores de los grupos compresores 13, 14, 15 (ver figura
25 2).

La figura 4 muestra un diagrama secuencial de las etapas de proceso 40, 42, 44 y 46. Partiendo de una primera etapa del proceso 40, se activa cíclicamente el procedimiento de optimización. Con una segunda etapa de proceso
30 42 se averigua el estado actual de la estación compresora 1. Para ello se captan los siguientes valores: valores reales 30, valores de consigna 31, valores límite y condiciones marginales 37 y modelos 24a, 24b y 24c de la biblioteca de modelos 26. Adicionalmente, se averigua en el marco de la invención el estado actual de conexión $S_{i,t-1}$ de la instalación compresora 1. Una tercera etapa de proceso 44 representa un punto de decisión. Con la tercera etapa de proceso 44 se toma la decisión de realizar un cálculo de optimización 46 en una cuarta etapa de proceso o de finalizar
35 el proceso 48. En base a los valores reales 30 y valores de consigna 31 existentes, puede decidirse si es necesario un cálculo de optimización. Para el caso de que la tercera etapa de proceso sea una decisión positiva Y, prosigue el proceso con la cuarta etapa de proceso 46. En la cuarta etapa de proceso 46 se resuelve el problema de optimización mixta de números enteros. Las magnitudes de entrada para la cuarta etapa del proceso 46 son a su vez valores reales 30, valores de consigna 31, valores límite y condiciones marginales 37 y los modelos de una biblioteca de modelos 26.
40 Como resultado de la cuarta etapa del proceso 46, se emiten valores de consigna de la velocidad de giro λ_i y nuevos estados de conexión $S_{i,t}$. El procedimiento ha terminado 48. Con la activación cíclica a partir de la primera etapa del proceso 40, corre de nuevo el proceso.

45

50

55

60

65

ES 2 321 872 T3

REIVINDICACIONES

5 1. Procedimiento para el control de una instalación compresora (1) con al menos dos grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) que pueden conectarse y/o desconectarse por separado y con un conjunto de dispositivos para modificar la potencia de trabajo de los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) y con un equipo de control (10),

10 **caracterizado** porque cuando se prescriben nuevos valores de consigna o se modifica el estado actual de la instalación compresora (1), se calcula, mediante un cálculo de optimización, a partir de una configuración de conexión actual ($S_{i,t-1}$) de los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) y para lograr un consumo optimizado de energía total (EG) de la instalación compresora (1), una nueva configuración de conexión ($S_{i,t}$) y porque la nueva configuración de conexión ($S_{i,t}$) se ajusta automáticamente a través del equipo de control (10).

15 2. Procedimiento según la reivindicación 1,

caracterizado porque se averigua un pronóstico mediante el cálculo de optimización para al menos un, y preferentemente varios instante(s) futuro(s).

20 3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2,

caracterizado porque se evalúan bloques de datos específicos de cada grupo compresor y/o campos característicos (20) específicos de cada grupo compresor y se determinan para los distintos grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) puntos de trabajo (22) que dependen de valores predeterminados o bien modificados del flujo másico \dot{m} y de un trabajo de transporte específico (y), ajustándose los puntos de trabajo (22) tal que se optimiza el consumo total de energía (E_G) de la instalación compresora (1).

25 4. Procedimiento según la reivindicación 3,

caracterizado porque los bloques de datos y/o campos característicos (20) resultan como función de un flujo másico (\dot{m}_i) o de un correspondiente caudal (\dot{V}_i) y de un trabajo de transporte específico (λ_i) de los distintos grupos compresores ($i = 1, \dots, N$).

30 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4,

caracterizado porque en el cálculo de optimización se calcula además de la configuración de conexión ($S_{i,t}$) una distribución de la carga entre los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) y dado el caso se modifica.

35 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5,

caracterizado porque el cálculo de optimización se realiza con un ciclo de regulación (R), en particular autoactivado.

40 7. Procedimiento según la reivindicación 6,

en el que como magnitudes de salida (32) del cálculo de optimización se ponen a disposición con cada ciclo de regulación (R) valores de consigna de la velocidad de giro (λ_i) y/o la nueva configuración de conexión ($S_{i,t}$) para el equipo de control.

45 8. Procedimiento según la reivindicación 7,

caracterizado porque mientras dura el ciclo de regulación (R), que en particular es un múltiplo de la duración de un ciclo (Z) de una regulación (12) del equipo de control (10), se mantienen constantes los valores de consigna de la velocidad de giro (λ_i) y/o la configuración de conexión ($S_{i,t}$).

50 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 u 8,

en el que los valores de consigna de la velocidad de giro (λ_i) se escalan con un factor común (α) y se utilizan como valores de consigna para un regulador de un grupo compresor (13, 14, 15).

55 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9,

en el que el equipo de control (10) con la nueva configuración de conexión ($S_{i,t} = 1$) activa ya antes de finalizar el ciclo de regulación (R) una fase de calentamiento de los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) para la posterior conexión de un grupo compresor ($S_{i,t-1} = 0$) que previamente se encontraba fuera de servicio.

60 11. Procedimiento según la reivindicación 10,

65

ES 2 321 872 T3

caracterizado porque al terminar la fase de calentamiento se comunica al equipo de control (10) la disponibilidad para la carga para el siguiente ciclo de regulación (R).

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11,

en el que como entrada (23) para el cálculo de optimización se evalúa

- un modelo (24) de los distintos grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) y/o
- una biblioteca de modelos (26) de la instalación compresora completa (1) y/o
- un trabajo de transporte actual específico ($y_{i,t-1}$) de los distintos grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) y/o
- un trabajo de transporte actual ($y_{g,t-1}$) específico de la instalación compresora (1) y/o
- un flujo másico actual ($\dot{m}_{i,t-1}$) a través de cada grupo compresor individual ($i = 1, \dots, N$), en particular a través de un compresor individual y/o
- un flujo másico actual ($\dot{m}_{g,t-1}$) a través de la instalación compresora (1) y/o
- la configuración de conexión actual ($S_{i,t-1}$) y/o
- una presión de aspiración ($P_{g,E}$) en el lado de entrada (E) de la instalación compresora (1) y/o
- una presión de aspiración ($P_{i,E}$) en el lado de entrada del grupo compresor individual y/o
- una presión final ($P_{g,A}$) en el lado de salida (A) de la instalación compresora (1) y/o
- una presión final ($P_{i,A}$) en el lado de salida (A) del grupo compresor individual ($i = 1, \dots, N$) y/o
- una temperatura ($T_{g,A}$) en el lado de salida (A) de la instalación compresora (1) y/o
- una temperatura ($T_{g,E}$) en el lado de entrada (E) de la instalación compresora (1) y/o
- una temperatura ($T_{i,A}$) en el lado de salida del grupo compresor individual ($i = 1, \dots, N$) y/o
- una temperatura ($T_{i,E}$) en el lado de entrada del grupo compresor individual ($i = 1, \dots, N$) y/o
- las velocidades de giro actuales de los grupos compresores.

13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 12,

en el que el cálculo de optimización según el principio de la regulación predictiva del modelo minimiza el consumo total de energía esperado hasta un instante (t) posterior mediante cálculos de pronóstico.

14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 13,

caracterizado porque en el cálculo de optimización se tiene en cuenta un consumo de energía (E_s) de un proceso de conexión.

15. Procedimiento según la reivindicación 14,

caracterizado porque el consumo de energía (E_s) del proceso de conexión se calcula a partir de los bloques de datos y/o los campos característicos (20) de los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$).

16. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 15,

caracterizado porque el trabajo de transporte específico (y_g) de la instalación compresora (1) se supone constante para el ciclo de regulación (R), en particular cuando los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) están conectados en paralelo.

17. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 15,

caracterizado porque el flujo másico (\dot{m}_g) de la instalación compresora (1) se supone constante para el ciclo de regulación (R), en particular cuando los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) están conectados en serie.

18. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 17,

ES 2 321 872 T3

en el que un grupo compresor activo ($S_i=1$) funciona al menos con un caudal (\dot{m}_{\min}) mínimo que puede prescribirse o bien prescrito.

19. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 18,

en el que el cálculo de optimización se realiza mediante un algoritmo Branch-and-Bound (ramificación y acotación).

20. Procedimiento según la reivindicación 19,

en el que se establece un límite (G) para el algoritmo Branch-and-Bound (ramificación y acotación) mediante la solución de un problema simplificado por medio de la programación cuadrática secuencial.

21. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 20,

en el que el cálculo de optimización resuelve problemas parciales mediante una programación dinámica, en particular en una conexión en serie.

22. Equipo de control (10) para el control de una instalación compresora (1) con al menos dos grupos compresores ($i = 1, \dots, N$) que pueden conectarse y/o desconectarse separadamente y con un conjunto de dispositivos para modificar la potencia de trabajo de los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$),

caracterizado por

- un módulo de optimización (11) con el que, cuando se prescriben nuevos valores de consigna o se modifica el estado actual de la instalación compresora, mediante un cálculo de optimización, a partir de una configuración de conexión actual ($S_{i,t-1}$) de los grupos compresores ($i = 1, \dots, N$), puede calcularse una nueva configuración de conexión ($S_{i,t}$) para lograr un consumo de energía total optimizado (E_g) de la instalación compresora (1), y

- por un módulo de ajuste (S) mediante el que puede ajustarse automáticamente la nueva configuración de conexión ($S_{i,t}$).

23. Equipo de control (10) según la reivindicación 22,

caracterizado porque el módulo de optimización (11) está dispuesto distanciado espacialmente, en particular varios kilómetros, del equipo de control (10).

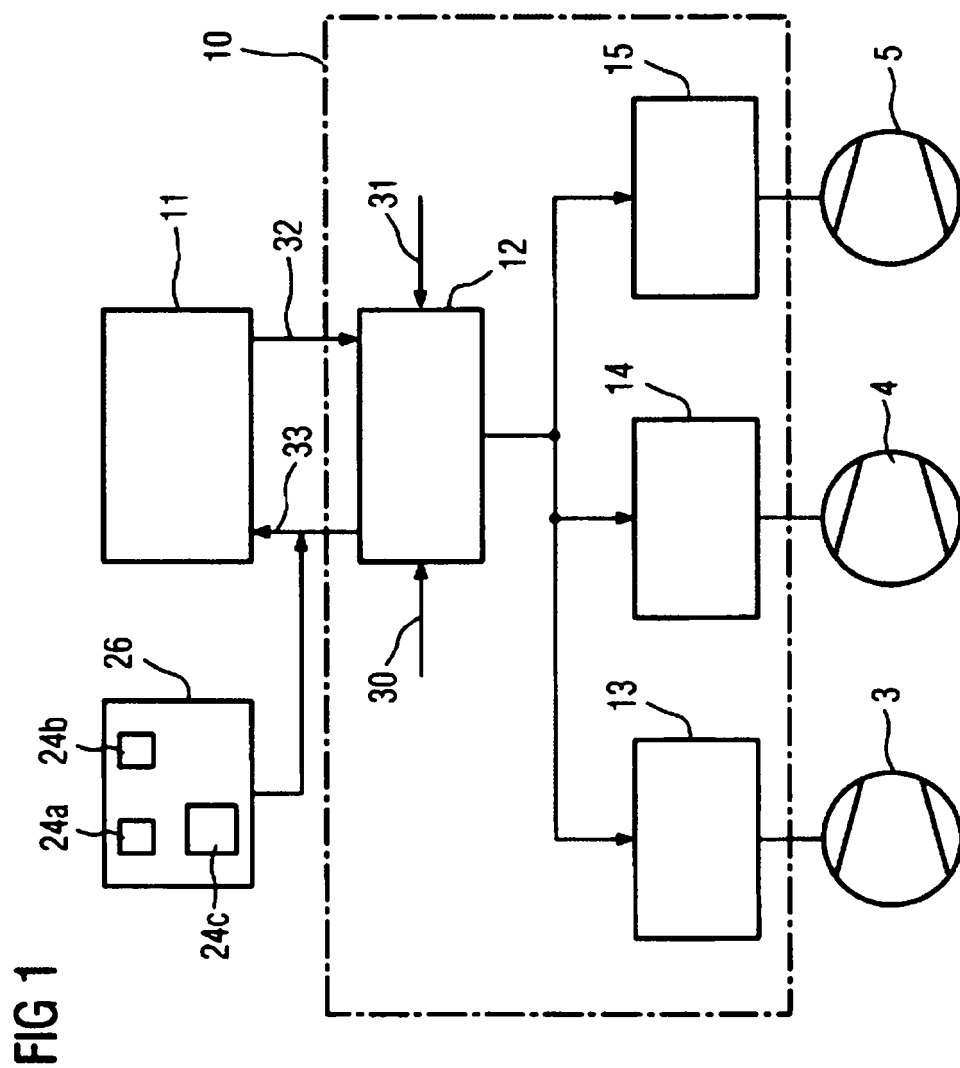
24. Equipo de control según una de las reivindicaciones 22 a 23,

caracterizado porque el módulo de optimización está orientado a tener en cuenta un consumo de energía (E_s) de un proceso de conexión.

25. Equipo de control según una de las reivindicaciones 22 a 24,

caracterizado porque el módulo de optimización (11) está orientado al cálculo de optimización para un conjunto de equipos de control de varias instalaciones compresoras.

26. Producto de programa de ordenador que contiene un software para realizar un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 21.



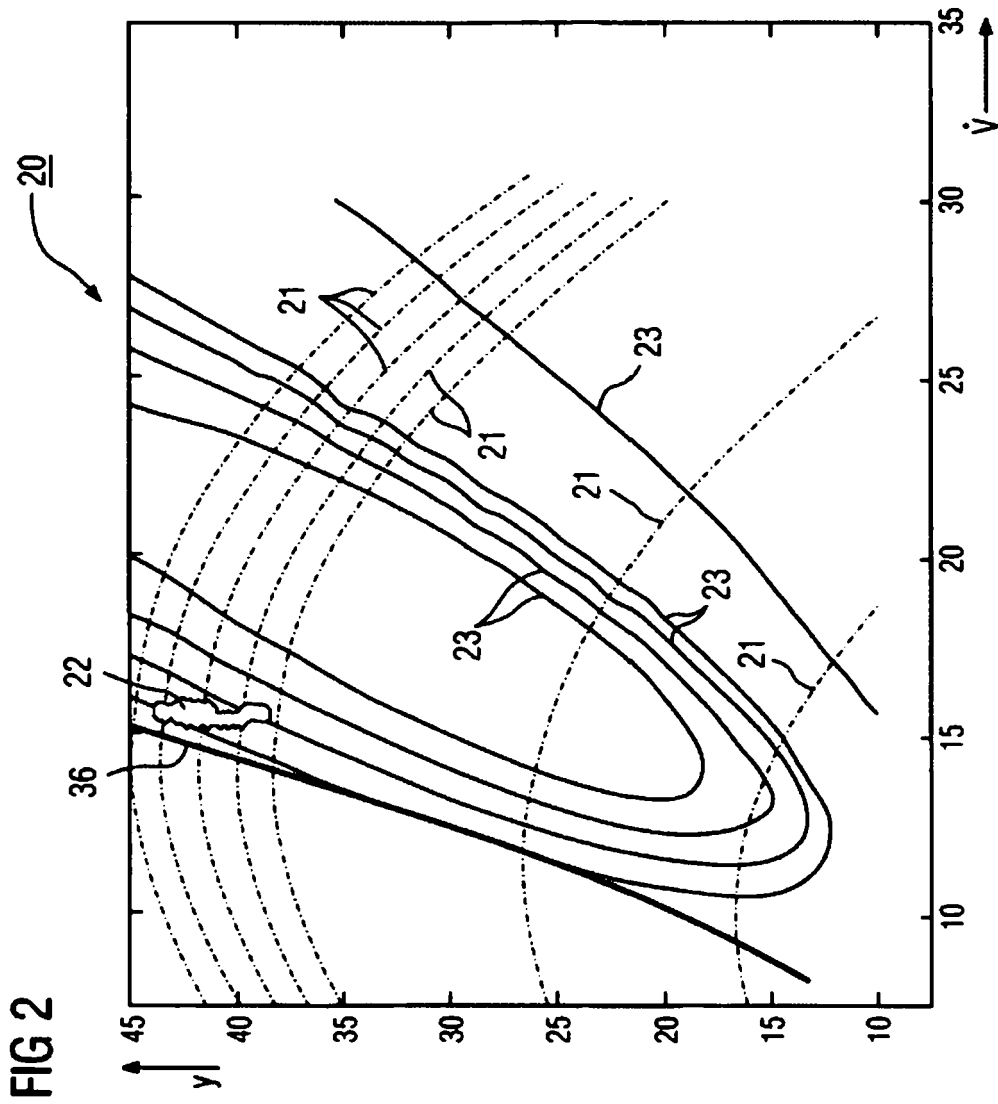


FIG 3

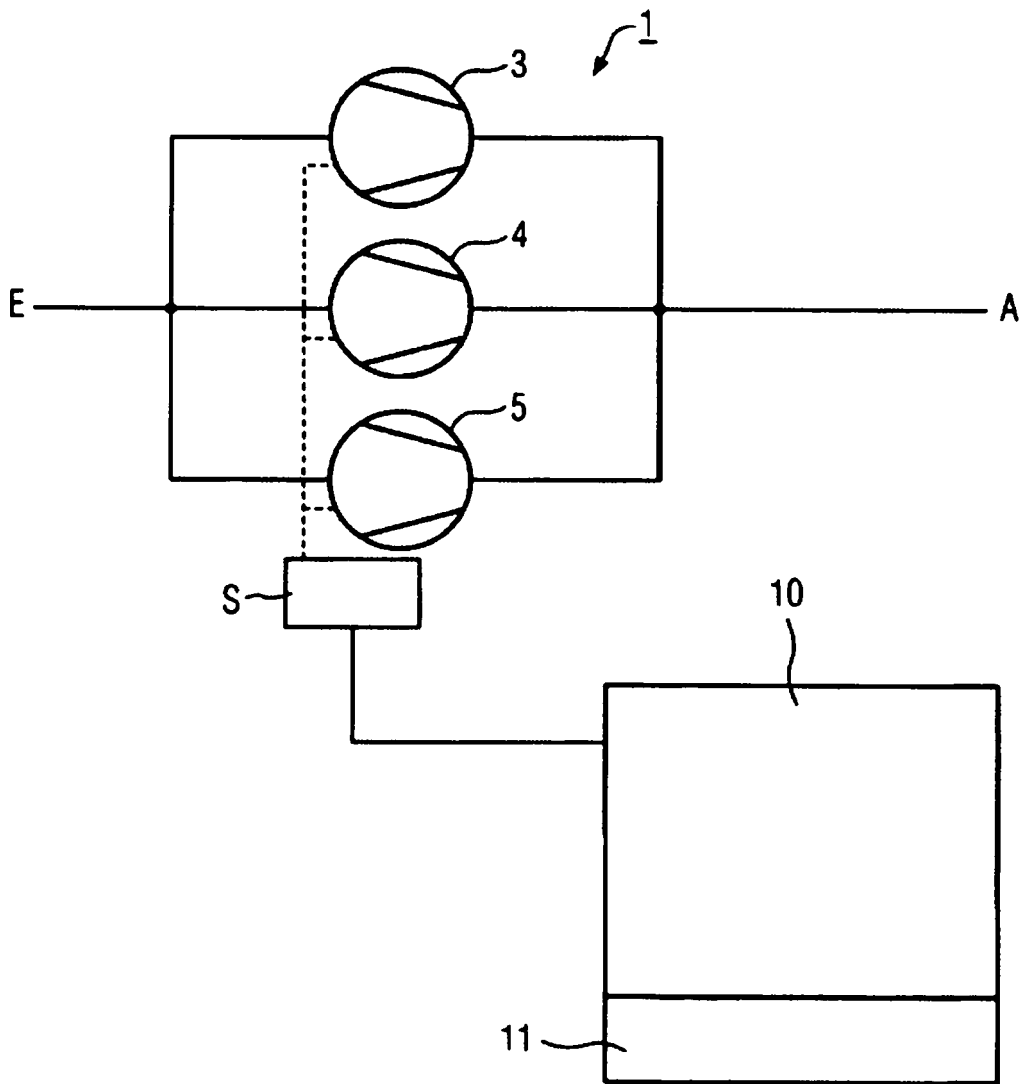


FIG 4

