

①⑨



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

①⑪ Veröffentlichungsnummer:

0 223 208
B1

①⑫

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

④⑤ Veröffentlichungstag der Patentschrift:
03.10.90

⑤① Int. Cl.⁵: **F04D 27/02**

②① Anmeldenummer: **86115792.3**

②② Anmeldetag: **13.11.86**

⑤④ **Verfahren und Einrichtung zum Regeln von Turbokompressoren.**

③⑩ Priorität: **13.11.85 DE 3540285**

④③ Veröffentlichungstag der Anmeldung:
27.05.87 Patentblatt 87/22

④⑤ Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
03.10.90 Patentblatt 90/40

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB IT LI NL

⑤⑥ Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 175 445
FR-A- 2 352 970
US-A- 3 797 233

⑦③ Patentinhaber: **MAN Gutehoffnungshütte**
Aktiengesellschaft,
Bahnhofstrasse 66 Postfach 11 02 40,
D-4200 Oberhausen 11(DE)

⑦② Erfinder: **Blotenberg, Wilfried, Dipl.-Ing., Irkensbusch 28,**
D-4220 Dinslaken(DE)

⑦④ Vertreter: **Glawe, Delfs, Moll & Partner Patentanwälte,**
Postfach 26 01 62 Liebherrstrasse 20,
D-8000 München 26(DE)

EP 0 223 208 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Regeln von Turbokompressoren zum Verhindern des Pumpens, von der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Art, sowie eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens

Als Pumpen bezeichnet man bei Kompressoren das stoßweise oder periodische Rückströmen von Fördermedium von der Druck- zur Saugseite. Dieser Zustand tritt z.B. bei zu hohem Enddruck bzw. Enddruck/Saugdruck-Verhältnis und/oder zu niedrigem Durchsatz ein. Im Kennfeld kann deshalb eine Pumpgrenzlinie eindeutig definiert werden, die das Kennfeld in den stabilen und instabilen Bereich teilt. Die Pumpgrenzlinie ist in der Regel gekrümmt, d.h. sie hat in verschiedenen Bereichen des Kennfeldes unterschiedliche Steigungen. In der häufig verwendeten Kennfelddarstellung mit Durchsatz und Druck als Koordinaten z.B., verläuft die Pumpgrenzlinie bei steigendem Druck flacher. Für andere mögliche Kennfelddarstellungen mit Leitschaukelstellung, Drehzahl, Förderhöhe des Kompressors oder dgl. gilt entsprechendes.

Um Kompressoren vor dem Pumpen zu schützen, wird in einem Sicherheitsabstand parallel zur Pumpgrenzlinie eine Abblaselinie definiert, und bei Annäherung des momentanen Arbeitspunktes an die Abblaselinie wird ein Abblaseventil mehr oder weniger geöffnet, so daß der Istwert einer Regelgröße, insbesondere des Drucksatzes, einen anhand der Abblaselinie und der Führungsgröße, insbesondere des Enddrucks, ermittelten Sollwert nicht übersteigt. Es gibt auch Regelungen, bei denen der Durchsatz als Führungsgröße zur Bildung des Sollwerts dient und der Enddruck die auf den Sollwert zu regelnde Regelgröße ist.

Der gekrümmte Verlauf der Abblaselinie hat zur Folge, daß eine vorgegebene Änderung der Führungsgröße an verschiedenen Stellen der Abblaselinie unterschiedlich große Änderungen des Sollwerts für die Regelgröße zur Folge hat. Dies wirkt sich als unterschiedlich starke Verstärkung im Regelkreis aus.

Pumpgrenzregler sind Sicherheitsregler und werden in der Regel so aktiviert, daß sie nahe der Stabilitätsgrenze arbeiten, um einen bestmöglichen Kompressorschutz zu gewährleisten. Die Lage der Stabilitätsgrenze wird sehr stark von der Gesamtverstärkung des Regelkreises beeinflusst. Eine hohe Gesamtverstärkung führt am ehesten zu Instabilität.

Der Verstärkungsfaktor des eigentlichen Reglers wird deshalb so eingestellt, daß er zusammen mit der sich aus der Steigung der Abblaselinie ergebenden Verstärkung noch zu einer innerhalb der Stabilitätsgrenze liegenden Gesamtverstärkung führt. Hierbei ist selbstverständlich auf den Bereich der Abblaselinie abzustellen, in welchem die höchste Verstärkung wirksam ist. In anderen Bereichen der Abblaselinie, zu denen auch die häufigsten Arbeitsbereiche gehören können, ist der Regelkreis dann nicht optimal justiert. Der stark gekrümmte Verlauf der Abblaselinie hat deshalb zur Folge, daß ein Pumpgrenzregler mit festeingestell-

ten Regelparametern in weiten Arbeitsbereichen nicht optimal justiert ist.

Ein Verfahren der eingangs genannten Art ist aus der FR-A-2 352 970 bekannt. Bei dieser bekannten Regelung ist die Verstärkung des Reglers in Abhängigkeit von der Regeldifferenz veränderbar, und zwar derart, daß der Verstärkungsfaktor erhöht wird, wenn die Regeldifferenz einen negativen Wert annimmt. Dadurch kann sichergestellt werden, daß der Regelkreis schnell reagiert, wenn der derzeitige Arbeitspunkt die Abblaselinie in Richtung auf die Pumpgrenzlinie überschreitet. Da die Verstärkung ausschließlich eine Funktion der Regeldifferenz ist, ist sie unabhängig vom Verlauf der Abblaselinie, und die unterschiedliche Steigung der Abblaselinie im Kennfeld wirkt sich entsprechend auf die Gesamtkreisverstärkung aus.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs genannten Art und eine Einrichtung zu seiner Durchführung zu schaffen, mit dem eine Anpassung des Regelverhaltens an die Erfordernisse in den verschiedenen Bereichen des Kennfeldes möglich ist.

Die Lösung der Aufgabe ist im Anspruch 1 angegeben. Die Unteransprüche beziehen sich auf vorteilhafte weitere Ausgestaltungen.

Die Erfindung beruht auf dem Grundgedanken, die Auswirkungen der sich entsprechend der Führungsgröße ändernden Steigung der gekrümmten Abblaselinie auf die Gesamtverstärkung des Regelkreises durch eine entsprechend gegenläufige Änderung des Verstärkungsfaktors des Reglers auszugleichen, so daß sich im gesamten Arbeitsbereich eine weitgehend konstante Gesamtverstärkung des Regelkreises ergibt. Dieses Grundprinzip kann aber auch durch Umschaltung zwischen zwei oder wenigen unterschiedlichen Werten des Verstärkungsfaktors des Reglers approximiert werden.

Ausführungsformen der Erfindung werden im folgenden anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 ein vereinfachtes Schema einer Einrichtung zur Regelung eines Turbokompressors zum Verhindern des Pumpens;

Fig. 2 schematisch den Verlauf der pumpgrenzlinie und Abblaselinie im Kennfeld des Kompressors;

Fig. 3 eine Teil einer vereinfachten Ausführungsform der Regeleinrichtung;

Fig. 4 ein Detail einer weiteren Ausführungsform der Regeleinrichtung.

Gemäß Fig. 1 wird im Saugstutzen 1 eines Kompressors K durch Meßfühler 3,5 der Druck vor und hinter einer Drosselblende gemessen, woraus ein Meßumformer 7 den Istwert für den saugseitigen Kompressordurchsatz V bildet. Am Kompressoraustrag erfaßt ein Meßfühler 9 den Istwert des Enddruckes P, der über einen Meßumformer 11 in einen Rechner 13 eingegeben wird. Der Rechner 13 ist mit einem Speicher 15 verbunden, in welchem der Verlauf der Abblaselinie A in dem durch P und V gegebenen Kompressorkennfeld abgespeichert ist. Aus dem Istwert von P und der Abblaselinie ermittelt der Rechner 13 einen Sollwert für den Durch-

satz V. Ist- und Sollwert werden in einem Differenzglied 17 verglichen und die Differenz als Eingangssignal einem Regler 19 zugeführt, der ein Proportional-Integral- und/oder Differentialverhalten aufweisen kann und dessen Ausgenassignal eine Stellgröße für ein vom Kompressoraustritt abzweigendes Abblaseventil 21 oder ein zum Saugstutzen zurückführendes Umblaseventil liefert.

Wie in Fig. 2 dargestellt, verläuft im Kompressor-kennfeld, welches durch den Durchsatz V als Abszisse und den Enddruck P (oder auch das Enddruck/Saugdruck-Verhältnis) als Ordinate gegeben ist, die Pumpgrenzlinie PG und die in einem Sicherheitsabstand rechts davon verlaufende Abblaselinie A jeweils gekrümmt. Dies hat zur Folge, daß eine bestimmte Änderung ΔP des als Führungsgröße dienenden Enddrucks unterschiedlich großen Änderungen ΔV bzw. $\Delta V'$ des Sollwertes für den Durchsatz entsprechen. Da der als Sollwertgeber dienende Speicher 15 mit dem Rechner 13 Teil des Regelkreises ist, wirken sich diese Unterschiede als Änderungen in der Gesamtverstärkung des Regelkreises aus, falls der Regler 19 einen konstanten Verstärkungsfaktor hat. In Fig. 2 entspricht der Steile untere Verlauf der Abblaselinie A einer kleinen Verstärkung und der flache obere Verlauf einer hohen Verstärkung. Wird dagegen, was ebenfalls bekannt ist, die Rolle von Führungs- und Regelgröße vertauscht und der Durchsatz V als Führungsgröße zur Bestimmung eines Sollwertes des Enddrucks P verwendet, dann kehren sich die Verhältnisse um und die Verstärkung ist im steilen Teil der Abblaselinie groß und im flachen Teil klein.

Die Gesamtverstärkung des Regelkreises ist die Summe der sich aus der Steigung der Abblaselinie ergebenden Verstärkung und dem Verstärkungsfaktor des Reglers 19 plus der sogenannten Streckenverstärkung, d.h. den durch die Regelstrecke, insbesondere dem Kompressor und dem Abblaseventil vorgegebenen Verstärkungsfaktoren. Um eine möglichst in allen Bereichen konstante Verstärkung zu erzielen, wird deshalb erfindungsgemäß der Verstärkungsfaktor im Regler 19 geändert. Bei der Ausführungsform nach Fig. 1 ist im Speicher 15 außer dem Verlauf der Abblaselinie A auch der Verlauf der Steigung S der Abblaselinie A als Funktion vorgegeben. Der Rechner 13 ermittelt für jeden Istwert der Führungsgröße P den zugehörigen Wert der Steigung der Abblaselinie und erzeugt ein entsprechendes Steuersignal, welches einem Steuereingang des Reglers 19 zugeführt und dort eine entsprechende Änderung des Verstärkungsfaktors des Reglers 19 bewirkt.

Anstatt den jeweiligen Wert der Steigung der Abblaselinie A aus dem Speicher 15 abzurufen, kann der Rechner 13 auch aus den zu verschiedenen Werten von P gehörenden Werten der Abblaselinie A deren Steigung ausrechnen.

Bei der vereinfachten Ausführungsform nach Fig. 3 wird der Istwert von P nicht einem Rechner, sondern einem einfachen Funktionsgeber 23 zugeführt, welcher jedem Istwert von P einen Sollwert für V entsprechend einem vorgegebenen, der Abblaselinie entsprechenden Zusammenhang fest zuordnet. Außerdem wird der Istwert von P einem

zweiten Funktionsgeber 25 zugeführt, welcher jedem Istwert von P einen entsprechenden Wert für die Steigung der Abblaselinie fest zuordnet, der dann als Steuersignal dem Regler 19 zum Steuern des Verstärkungsfaktors zugeführt wird.

Bei der Ausführungsform nach Fig. 4 wird der Istwert von P ebenfalls dem Funktionsgeber 23 und außerdem einem Komparator 27 zugeführt, der den Istwert von P mit vorgegebenen oberen und unteren Granzwerten P_{\max} , P_{\min} vergleicht. Solange sich der Istwert von P innerhalb dieser Grenze befindet, bleibt der Verstärkungsfaktor des Reglers 19 unverändert. Bei Überschreiten von P_{\max} oder Unterschreiten von P_{\min} wird der Verstärkungsfaktor des Reglers 19 um einen fest vorgegebenen Wert erhöht bzw. erniedrigt. Dies entspricht einer Approximation des gekrümmten Verlaufes der Abblaselinie durch drei Geradenabschnitte mit unterschiedlicher Steigung, wobei der mittlere Geradenabschnitt zwischen den Granzwerten P_{\min} , P_{\max} verläuft. Bei einer noch einfacheren Ausführungsform, die einer Approximation der Abblaselinie durch nur zwei Geradenabschnitte entspricht, wird je nach Über- oder Unterschreiten eines einzigen Granzwertes der Verstärkungsfaktor zwischen zwei Werten umgesteuert.

Auch bei der Ausführungsform nach Fig. 1 ist es möglich, den gekrümmten Verlauf der Abblaselinie bzw. ihrer Steigung durch Geradenabschnitte anzunähern, wobei im Speicher 15 lediglich die Koordinaten der Knickpunkte der Geradenabschnitte festgelegt zu sein brauchen, aus denen dann der Rechner 13 den Verlauf des Geradenabschnittes bzw. seine Steigung ermitteln kann. Auch kann die Abblaselinie im Speicher 15 nicht durch eine Wertetabelle, sondern durch eine mathematische Funktion vorgegeben sein. Entsprechend kann bei der Ausführungsform nach Fig. 3 im Funktionsgeber 25 ein durch zwei oder mehr Geradenabschnitte approximierter Verlauf der Abblaselinie vorgegeben sein.

Selbstverständlich ist die beschriebene Funktionsweise nicht an die gewählte Kennfelddarstellung mit den Koordinaten Enddruck und Volumenstrom gebunden, sondern ist sinngemäß auch an jede andere, dem Fachmann geläufige Kennfelddarstellung anpaßbar.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Regeln eines Turbokompessors zum Verhindern des Pumpens, bei dem die Istwerte einer Führungsgröße, insbesondere des Enddruckes, und einer Regelgröße, insbesondere des Durchsatzes, die zusammen die Lage des Arbeitspunktes im Kompressor-kennfeld definieren, laufend erfaßt werden, aus der Führungsgröße und einer im Kennfeld vorgegebenen Abblaselinie ein Sollwert für die Regelgröße gebildet wird, und anhand von Soll- und Istwert der Regelgröße über einen Regler ein Stellsignal für ein Abblaseventil erzeugt wird, wobei der Verstärkungsfaktor des Reglers veränderbar ist, dadurch gekennzeichnet, daß der Verstärkungsfaktor in Abhängigkeit vom Istwert der Führungsgröße verändert wird und daß der Einfluß der

in Abhängigkeit von der Führungsgröße unterschiedlichen Steigung der Abblaselinie auf die Gesamtverstärkung des Regelkreises mindestens annähernd kompensiert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Verstärkungsfaktor des Reglers mindestens annähernd umgekehrt proportional zu dem zum jeweiligen Istwert der Führungsgröße gehörenden Wert der Steigung der Abblaselinie gesteuert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei Approximation der Abblaselinie durch Geradenabschnitte der Verstärkungsfaktor des Reglers zwischen verschiedenen diskreten Werten umgeschaltet wird, wenn der Istwert der Führungsgröße vorgegebene Grenzwerte über- oder unterschreitet.

4. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, mit Meßfüh-
lern für Führungs- und Regelgröße, einem von der Führungsgröße beaufschlagten, vorgegebene Daten für die Abblaselinie enthaltenden Funktionsgeber zur Erzeugung des Sollwertes der Regelgröße, einem mit Ist- und Sollwert der Regelgröße beaufschlagten Differenzglied, einem von dessen Ausgangssignal beaufschlagten Regler und einem vom Regler gesteuerten Abblaseventil, wobei der Regler (19) einen Steuereingang zum Verändern seines Verstärkungsfaktors aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßfühler (9) für die Führungsgröße an einen Signalgeber (13, 25, 27) mit vorgegebenen, der Steigung der Abblaselinie zugeordneten Daten angeschlossen ist, und daß der Ausgang des Signalgebers (13, 25, 27) mit dem Steuereingang des Reglers (19) verbunden ist.

5. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Signalgeber (13, 15) eine die Steigung der Abblaselinie in Abhängigkeit von der Führungsgröße wiedergebende Wertefolge vorgegeben ist.

6. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß im Signalgeber (27) Grenzwerte P_{\max} , P_{\min} für die Führungsgröße vorgegeben sind und daß der Signalgeber (27) Umschaltssignale zum stufenweisen Ändern des Regelfaktors des Reglers (19) bei Unterschreiten bzw. Überschreiten der Grenzwerte erzeugt.

7. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Verstärkungsfaktor des Reglers durch wahlweises Aufschalten eines dem Reglereingang vorgeschalteten Verstärkers steuerbar ist und das Ausgangssignal des Signalgebers das Aufschalten des Verstärkers steuert.

Claims

1. A method of controlling a turbocompressor to prevent surge, wherein the actual values of a reference variable, in particular final pressure, and a controlled variable, in particular flow rate, which together define the position of the working point in the compressor performance graph, are regularly determined, a desired value for the controlled variable is formed from the reference variable and a predetermined blow-off curve in the performance

graph, and a control signal for a blow-off curve is generated via a controller on the basis of the desired value and actual value of the controlled variable, the amplification factor of the controller being variable, characterised in that the amplification factor is varied as a function of the actual value of the reference variable, and in that the effect of the gradient of the blow-off curve, which varies as a function of the reference variable, on the overall amplification of the control circuit is at least approximately compensated.

2. A method according to Claim 1, characterised in that the amplification factor of the controller is at least approximately inversely proportional to the value of the gradient of the blow-off curve, which value is associated with the respective actual value of the reference variable.

3. A method according to Claim 1, characterised in that with approximation of the blow-off curve by straight sections the amplification factor of the controller is switched between different discrete values when the actual value of the reference variable exceeds or falls below predetermined limit values.

4. An apparatus for carrying out the method according to any one of Claims 1 to 3, having sensors for reference and controlled variables, a function generator, which is acted upon by the reference variable and which contains predetermined data for the blow-off curve, for generating the desired value of the controlled variable, a differentiator acted upon by the actual value and desired value of the controlled variable, a controller acted upon by the output signal of the differentiator and a blow-off valve controlled by the controller, wherein the controller (19) has a control input for varying its amplification factor, characterised in that the sensor (9) for the reference variable is connected to a signal generator (13, 25, 27) with predetermined data associated with the gradient of the blow-off curve, and in that the output of the signal generator (13, 25, 27) is connected to the control input of the controller (19).

5. An apparatus according to Claim 4, characterised in that a sequence of values reproducing the gradient of the blow-off curve as a function of the reference variable is predetermined in the signal generator (13, 25).

6. An apparatus according to Claim 4, characterised in that limit values P_{\max} , P_{\min} for the reference variable are predetermined in the signal generator (27), and in that the signal generator (27) generates switching signals for the variation in stages of the control factor of the controller (19) when the limit values are not reached or are exceeded.

7. An apparatus according to Claim 1 [sic], characterised in that the amplification factor of the controller can be controlled by the selective switching-on of an amplifier connected upstream of the controller input and the output signal of the signal generator controls the switching-on of the amplifier.

Revendications

1. Procédé pour réguler un turbocompresseur en évitant le pompage, dans lequel on détecte en conti-

nu les valeurs réelles d'une grandeur pilote, notamment de la pression de sortie, et d'une grandeur réglée, notamment du débit, qui définissent conjointement la position du point de fonctionnement dans le diagramme caractéristique du compresseur, on forme une valeur de consigne de la grandeur réglée à partir de la grandeur pilote et d'une ligne de purge prédéterminée dans le diagramme caractéristique, un signal de manoeuvre d'une soupape de purge étant produit par un régulateur en se référant à la valeur de consigne et à la valeur réelle, le facteur d'amplification du régulateur pouvant varier, caractérisé en ce qu'on fait varier le facteur d'amplification en fonction de la valeur réelle de la grandeur pilote, et en ce qu'on compense, au moins approximativement l'influence de la pente, variable en fonction de la grandeur pilote, de la ligne de purge sur l'amplification d'ensemble du circuit de réglage.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'on commande le facteur d'amplification du régulateur de façon, au moins approximativement, inversement proportionnelle à la valeur de la pente de la ligne de purge correspondant à chaque valeur réelle de la grandeur pilote.

3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que lors de l'approximation de la ligne de purge par des segments de droite, on commute le facteur d'amplification du régulateur entre des valeurs discrètes différentes quand la valeur réelle de la grandeur pilote franchit des valeurs limites prédéterminées vers le haut ou vers le bas.

4. Dispositif pour la mise en pratique du procédé selon l'une des revendications 1 à 3, comportant des capteurs pour la grandeur pilote et la grandeur réglée, un générateur de fonction sollicité par la grandeur pilote et contenant des données prédéterminées de la ligne de purge pour produire la valeur de consigne de la grandeur réglée, un élément soustracteur sollicité par la valeur réelle et la valeur de consigne de la grandeur réglée, un régulateur sollicité par le signal de sortie correspondant et une soupape de purge commandée par le régulateur, le régulateur (19) comportant une entrée de commande pour faire varier son facteur d'amplification, caractérisé en ce que le capteur (9) pour la grandeur pilote est raccordé à un générateur de signaux (13, 25, 27) muni de données prédéterminées et associées à la pente de la ligne de purge, et en ce que la sortie du générateur de signaux (13, 25, 27) est reliée à l'entrée de commande du régulateur (19).

5. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que dans le générateur de signaux (13, 15) est prédéterminée une suite de valeurs donnant la pente de la ligne de purge en fonction de la grandeur pilote.

6. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que des valeurs limites P_{\max} , P_{\min} de la grandeur pilote sont prédéterminées dans le générateur de signaux (27) et en ce que le générateur de signaux (27) produit des signaux de commutation pour faire varier par étages le facteur de réglage du régulateur (19) lors du franchissement des valeurs limites vers le haut et vers le bas.

7. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé

en ce que le facteur d'amplification du régulateur peut être commandé par branchement sélectif d'un amplificateur raccordé devant l'entrée du régulateur et en ce que le signal de sortie du générateur de signaux commande le branchement de l'amplificateur.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

