

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 967 396 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
29.12.1999 Patentblatt 1999/52

(51) Int. Cl.⁶: F04D 27/00

(21) Anmeldenummer: 99106086.4

(22) Anmeldetag: 26.03.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(71) Anmelder:
GHH BORSIG Turbomaschinen GmbH
46145 Oberhausen (DE)

(72) Erfinder:
Blotenberg, Wilfried, Dr.-Ing.
46535 Dinslaken (DE)

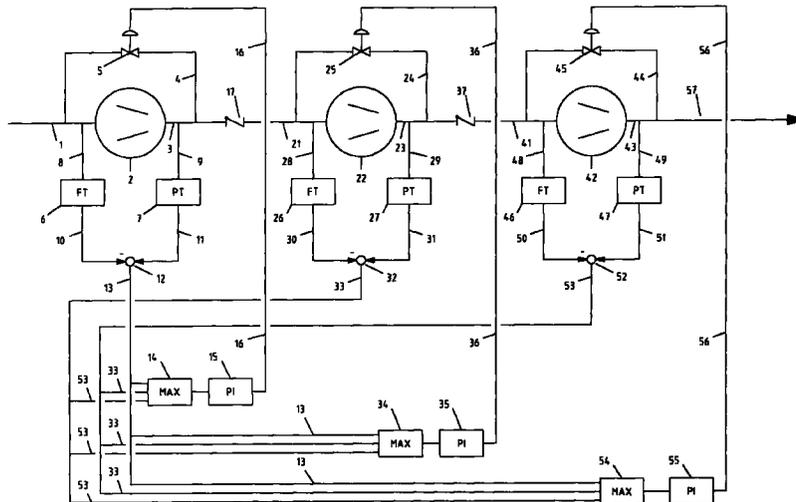
(30) Priorität: 26.06.1998 DE 19828368

(54) Verfahren zum Betreiben von Turboverdichtern

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben von mehrstufigen Turboverdichtern (2, 22, 42) mit mehreren sich gegenseitig beeinflussenden Reglern (15, 35, 55), bei dem jede Verdichterstufe eigene Pumpgrenzregelventile (5, 25, 45) aufweist, die jeweils in die Ansaugleitungen (1, 21, 41) der eigenen Verdichterstufe (2, 22, 42) abblasen.

die Differenz aus Sollwert (Förderhöhe) minus Istwert (Durchfluß) und bewirkt, wenn der Istwert im Verhältnis zum Sollwert zu klein ist, eine graduelle Öffnung der entsprechenden Pumpgrenzregelventile (5, 25 bzw. 45), bis der Istdurchfluß genau dem von der jeweiligen Förderhöhe abhängigen Solldurchfluß entspricht. Die Regelung erfolgt über eine Maximalauswahl (14, 34, 54), die den Pumpgrenzreglern (15, 35, 55) mit den Signalleitungen (16, 36, 56) zum Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45) vorgeschaltet ist.

Die Regelung erfolgt über Durchflußrechner (6, 26, 46) zur Berechnung des Ansaugdurchflusses sowie über Rechner (7, 27, 47) für die Ermittlung der Förderhöhe. Ein Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12, 32, 52) ermittelt



Figur 1

EP 0 967 396 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Betreiben von Turboverdichtern mit mehreren sich gegenseitig beeinflussenden Reglern.

[0002] Turboverdichter werden häufig mit mehreren Reglern ausgerüstet. Der Pumpgrenzregler eines Turboverdichters überwacht z. B. die Lage des Kompressorarbeitspunktes im Kennfeld und öffnet bei unzulässig kleinem Kompressordurchsatz ein Pumpgrenzregelventil zur Saugseite oder zur Atmosphäre. Zur Anpassung der Turboverdichter an die prozeßseitigen Erfordernisse werden häufig Druck- oder Durchflußregler eingesetzt, deren Stellorgan verstellbare Leitschaukeln oder Drosselklappen sind. Bei Verdichtern mit drehzahlvariablem Antrieb kann auch die Drehzahl zur Kapazitätsanpassung verstellt werden.

[0003] Eine Verstellung des Pumpgrenzregelventils beeinflußt auch den Verdichterenddruck bzw. den Durchfluß zum Prozeß. Eine Verstellung des Stellorgans des Prozeßgrößenreglers hat einen Einfluß auf die Lage des Arbeitspunktes im Kennfeld und kann dadurch den Pumpgrenzregler eingreifen lassen.

[0004] Üblicherweise wird der Pumpgrenzregler als kritischer Turbomaschinen-Schutzregler auf das schnellstmögliche Ansprechverhalten eingestellt. Für Pumpgrenzregelungen werden die schnellsten verfügbaren Regler verwendet, die die schnellsten verfügbaren Ventile ansteuern.

[0005] Die Prozeßgrößenregelung muß an das Zeitverhalten des Prozesses angepaßt sein. Insbesondere Druckregelungen zeichnen sich durch deutlich längere Zeitkonstanten als die für Pumpgrenzregelungen erforderlichen aus.

[0006] Hierdurch ist im Normalfall sichergestellt, daß sich die verschiedenen Regelkreise nicht gegenseitig unzulässig beeinflussen. Der Pumpgrenzregler regelt eine Störung wesentlich schneller aus als der Prozeßgrößenregler. Er hat das Pumpgrenzregelventil in die neue erforderliche Position gebracht, noch bevor der Prozeßgrößenregler merklich reagiert hat. Eine zusätzliche Entkopplung der Pumpgrenzregler untereinander ist in diesen Fällen nicht erforderlich.

[0007] Es gibt aber Anwendungen, in denen entweder die Pumpgrenzregler langsam reagieren oder der Prozeßgrößenregler schnell reagieren muß. In diesen Anwendungsfällen kann eine gegenseitige Beeinflussung der Regler untereinander nicht ausgeschlossen werden. Eine Störung auf der Verdichtersaugseite kann z. B. zur Folge haben, daß sich der Arbeitspunkt der Pumpgrenze ein Stück weiter nähert.

[0008] Der Pumpgrenzregler reagiert hierauf und öffnet das Pumpgrenzregelventil zum Schutz des Verdichters ein Stück. Dadurch wird weniger Fördermedium in den Prozeß gefördert und der Durchfluß (bzw. der Druck) auf der Verdichterdruckseite sinkt. Dies bemerkt der Prozeßgrößenregler und erhöht die Förderleistung des Verdichters. Die Folge ist, daß sich der Arbeitspunkt

von der Pumpgrenze entfernt. Hierauf reagiert nun der Pumpgrenzregler und schließt das Pumpgrenzregelventil entsprechend. Dieses läßt aber nun den Druck sowie den Durchfluß auf der Verdichterdruckseite ansteigen. Der Prozeßgrößenregler reagiert hierauf, indem er die Förderleistung des Kompressors entsprechend reduziert. Dieses bringt aber in Folge den Arbeitspunkt wieder in die Nähe der Pumpgrenze, so daß der Pumpgrenzregler das Pumpgrenzregelventil wieder öffnet. Der Vorgang beginnt von vorn und kann sich bei ungünstiger Wahl der Zeitparameter und ungünstiger Phasenlage zu einer Dauerschwingung von Prozeßgröße und Pumpgrenzregelventil führen.

[0009] Turboverdichter mit mehreren Stufengruppen werden, insbesondere wenn Fördermedium zwischen den verschiedenen Stufen eingespeist oder entnommen wird, mit individuellen Pumpgrenzregelungen pro Stufengruppe geschützt. Auch hier kann eine wechselseitige Beeinflussung der Pumpgrenzregler untereinander erfolgen. Falls durch eine Störung auf der Saugseite der Niederdruckstufe das Druckverhältnis über dieser Stufe erhöht wird, bewegt sich der Arbeitspunkt dieser Stufe in Richtung Pumpgrenze, wodurch ein Eingriff des Pumpgrenzreglers der Niederdruckstufe erforderlich werden kann, der das Pumpgrenzregelventil der Niederdruckstufe ein Stück öffnet. Dieses bewirkt eine Absenkung des Enddrucks der Niederdruckstufe bzw. des Eintrittsdrucks der Hochdruckstufe. Dies geht einher mit einer Erhöhung des Druckverhältnisses der Hochdruckstufe, was nun ein Öffnen des Pumpgrenzregelventils dieser Stufe zur Folge hat. Da bei Gaskompressoren die Pumpgrenzregelventile das druckseitige Gas jeweils zur Saugseite entspannen, bewirkt ein Öffnen des hochdruckseitigen Pumpgrenzregelventils einen Anstieg des Saugdrucks dieser Stufe und damit einen Anstieg des Enddruck der Niederdruckstufe. Die Pumpgrenzregelung der Niederdruckstufe wird hierdurch zum weiteren Eingreifen gezwungen, das Niederdruck-Pumpgrenzregelventil öffnet weiter.

[0010] Bei schnellen transienten Vorgängen ist es durchaus möglich, daß der Pumpgrenzregler heftiger greift als unbedingt erforderlich und das Pumpgrenzregelventil weiter geöffnet wird als für den Schutz des Kompressors erforderlich. Dies bewirkt, daß nach dem Abklingen der ersten Störung die Pumpgrenzregelventile wieder geschlossen werden. Da die Störung im Niederdruckteil begonnen hat, schließt der Pumpgrenzregler der Niederdruckstufe dieses Ventil wieder. Damit steigt der Enddruck dieser Stufe und somit auch der Ansaugdruck der Hochdruckstufe. Das Druckverhältnis der Hochdruckstufe sinkt und der entsprechende Pumpgrenzregler schließt das hochdruckseitige Pumpgrenzregelventil. Dies hat nunmehr wieder einen Einfluß auf den Niederdruckteil usw. Sind die Regler derart eingestellt, daß sie auf eine transiente Störung mit einer gewissen Übersteuerung reagieren, kann eine phasenverschobene gegenseitige Beeinflussung der beiden Pumpgrenzregler nicht ausgeschlossen werden.

[0011] Die Gefahr von Wechselwirkungen steigt, wenn nicht nur zwei Verdichterstufengruppen hintereinander, sondern drei oder mehr Verdichterstufen angeordnet sind. Das Verfahren ist nicht nur auf Pumpgrenzregler anwendbar, sondern allgemein einsetzbar.

[0012] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Entkopplung der Regelkreise in der Art zu schaffen, das auch bei gleichem Zeitverhalten aller Größen eine schwingungsanregende Wechselwirkung der Regelkreise untereinander vermieden wird.

[0013] Die Lösung der Aufgabe erfolgt in der Weise, wie es in Anspruch 1 und 10 angegeben wird. Die Unteransprüche stellen jeweils eine vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens und der Vorrichtung dar.

[0014] Erfindungsgemäß wird für eine solche Regelkreisarchitektur ein Verfahren zur Entkopplung der Regler entwickelt. Ziel dieses Entkopplungsverfahrens ist es, die Wechselwirkung der einzelnen Regler aufzuheben und in der Wahl der Reglerparameter völlig frei zu sein.

[0015] Es handelt sich daher hier nicht um ein Verfahren zum Schutz von Kompressoren vor Pumpen, sondern um ein Verfahren, mit dem Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Reglern, z. B. Pumpgrenz- und Prozeßgrößenreglern, vermieden werden.

[0016] Ein typischer Maschinenstrang zur Kompression von Gas besteht aus drei in Strömungsrichtung hintereinander angeordneten Stufengruppen.

[0017] Andere Anordnungen sind ebenfalls möglich, das Verfahren darauf ebenso anwendbar. Eine dieser Stufen besteht jeweils aus der Ansaugleitung der Niederdruckstufe, dem Verdichter, der Druckleitung und einer Umblaseleitung mit dem Pumpgrenzregelventil, ferner einem Durchflußrechner zur Berechnung des Ansaugdurchflusses sowie einem Rechner zur Ermittlung der Förderhöhe. Die Rechner sind über Signalleitungen und mit den Rohrleitungen und über weitere Signalleitungen mit dem Vergleich verbunden. Ein Vergleich ermittelt die Differenz aus Sollwert (Förderhöhe) minus Istwert (Durchfluß) und bewirkt immer dann, wenn der Istwert im Verhältnis zum Sollwert zu klein ist, eine graduelle Öffnung des Pumpgrenzregelventils, bis der Istdurchfluß genau dem von der jeweiligen Förderhöhe abhängigen Solldurchfluß entspricht. Die Verstellung erfolgt erfindungsgemäß über die Maximalauswahl, den PI-Regler sowie die Signalleitung zum Pumpgrenzregelventil. Eine Rückschlagklappe entkoppelt den ersten Verdichter von der nachgeschalteten Mitteldruckstufe.

[0018] Die Ergebnisse eines Soll-/Ist-Wert-Vergleiches werden über eine Steuerleitung direkt auf den Pumpgrenzregler, der das Pumpgrenzregelventil über eine Steuerleitung verstellt, übertragen.

[0019] Ist der Istdurchfluß kleiner als der von der Förderhöhe abhängige Solldurchfluß, wird die im Vergleich ermittelte Regeldifferenz positiv und verstellt über die Steuerleitung den Ausgang des Pumpgrenzreglers

in Richtung eines weiteren öffnenden Pumpgrenzregelventils.

[0020] Erfindungsgemäß wird nun den Reglern eine Maximalauswahl vorgeschaltet, deren einer Eingang die bekannte Differenz aus Sollwert und Istwert des zugehörigen Verdichters ist. Dieser Maximalauswahl wird die Regeldifferenz der anderen Verdichterstufen ebenfalls aufgeprägt. Die Wirkung der Regeldifferenz ist derart, daß ein positives Signal den Reglerausgang sinken läßt und damit das Pumpgrenzregelventil öffnet und ein negatives Signal das Pumpgrenzregelventil schließt. Die Maximalauswahl bewirkt nun, daß immer dann, wenn eine der drei Maschinen in einen Betriebsbereich gelangt, der ein Öffnen des Pumpgrenzregelventils verlangt, diese Größe allen drei Pumpgrenzreglern aufgeprägt wird und jeder Regler sein zugehöriges Pumpgrenzregelventil über die Steuerleitungen entsprechend öffnet. Eine wechselseitige Beeinflussung ist dadurch verhindert, weil alle Pumpgrenzregelventile gleichzeitig und bei gleicher Reglereinstellung auch um den gleichen Betrag öffnen.

[0021] Haben alle drei Verdichterstufen den gefährlichen Arbeitsbereich, in dem der Durchfluß geringer als zulässig ist, durch Öffnen der Pumpgrenzregelventile wieder verlassen, schalten die Maximalauswahlglieder jeweils die Regeldifferenz auf den Regler, die das Pumpgrenzregelventil mit dem kleinsten Gradienten schließt.

[0022] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann zwischen den Vergleichen sowie der Maximalauswahl eine Anordnung zur Beeinflussung der Regeldifferenzen zwischengeschaltet werden.

[0023] Die Regeldifferenz wird über die Signalleitung einem Verzögerungsglied erster Ordnung und einem addierenden Begrenzer aufgeschaltet. Dieser Begrenzer addiert die Eingänge vorzeichengerecht, d. h., er subtrahiert von der Regeldifferenz die über das Verzögerungsglied verzögerte Regeldifferenz. Im stationären Zustand ist diese Differenz null, so daß der Addierer lediglich das Signal der Maximalauswahl weitergibt. Der Begrenzer ist auf einen Bereich von 0 bis 1 eingestellt, er begrenzt negative Werte auf den Wert null.

[0024] Sollte sich nun der Arbeitspunkt auf die Regelinie zubewegen, folgt das Ausgangssignal des Verzögerungsgliedes zeitlich verzögert. Bei einer größeren Änderung der Regeldifferenz kann das Ausgangssignal des Limitierers bereits positiv werden, wenn die Regeldifferenz selbst noch negativ ist. Andererseits verschwindet die Wirkung der Korrekturgröße, d. h. der Ausgang des Limitierers wird null, wenn die Regeldifferenz stationär einen von null verschiedenen Wert annimmt.

[0025] Dem Limitierer kann bei Bedarf noch eine Konstante aufaddiert werden. Diese Konstante bewirkt einen Versatz. Der Ausgang des Begrenzers wird erst dann größer null, wenn die Differenz der beiden anderen Eingangsgrößen den als Konstante eingestellten Schwellwert überschritten hat.

[0026] Selbstverständlich kann dieser Offset bzw. diese Konstante auch ohne die verzögernde Wirkung des Verzögerungsgliedes erster Ordnung angewendet werden.

[0027] Es versteht sich von selbst, daß der Betrag des konstanten Offsets abhängig gemacht werden kann von bestimmten Betriebszuständen oder Prozeßgrößen.

[0028] Diese Maßnahmen können selbstverständlich auch angewendet werden, wenn ein Pumpgrenzregler und ein Prozeßgrößenregler zu entkoppeln sind.

[0029] Die Korrekturgröße auf den Prozeßgrößenregler wirkt dann derart, daß bei Annäherung an die Pumpgrenze oder beim Überschreiten der Regellinie der Eingang des Prozeßgrößenreglers derart verändert wird, daß der die Wirkung des Pumpgrenzreglers unterstützt und den Kompressor aus dem Gefährdungsbe-
reich herausfährt.

[0030] Dadurch wird verhindert, daß der Prozeßgrößenregler der Wirkung des Pumpgrenzreglers entgegenwirkt und dadurch eine wechselseitige Reglerbeeinflussung entsteht.

[0031] Durch die Parameterwahl des Limitierers kann z. B. auch erreicht werden, daß bei Annäherung des Arbeitspunktes an die Pumpgrenze das Eingangssignal des Prozeßgrößenreglers derart beeinflußt werden kann, daß nur geringe Gradienten für eine Reduzierung der Kompressorleistung zugelassen werden. Hierdurch ist der Prozeßgrößenregler noch wirksam, kann jedoch nur mit begrenzter Wirkung eingreifen.

[0032] Eine ähnliche Wirkung läßt sich dadurch realisieren, daß einer Minimalauswahl vor dem Regler eine über einen Begrenzer beeinflusste Korrekturgröße aufgeschaltet wird.

[0033] Eine weitere Möglichkeit zur Verhinderung von gegenseitiger Beeinflussung verschiedener Regelkreise besteht darin, den Gradienten für Stellgrößenveränderungen zu begrenzen. Dazu werden den Pumpgrenzreglern bzw. den Prozeßgrößenreglern ein Gradientenbegrenzer mit integriertem Eingangverstärker, Begrenzer und Integrator nachgeschaltet.

[0034] Im Soll-Ist-Wert-Vergleich wird die Differenz aus aktuellem Kompressordurchfluß und minimal zulässigen Durchfluß gebildet und über eine Signalleitung dem Pumpgrenzregler zugeleitet, der das Pumpgrenzregelventil derart verstellt, daß der Kompressor nicht im instabilen Arbeitsbereich betrieben wird.

[0035] Über die Signalleitungen werden einem zusätzlichen Vergleich der Prozeßgrößensollwert und der Prozeßgrößenistwert aufgeschaltet. Die Differenz dieser beiden Werte wirkt über eine eigene Signalleitung und einen Begrenzer und einen Prozeßgrößenregler. Dieser Prozeßgrößenregler verstellt das zugehörige Stellorgan (Leitschaukeln, Drosselorgan, Drehzahl) derart, daß der Prozeßgrößenistwert genau dem Sollwert entspricht.

[0036] Der Limitierer begrenzt die Regeldifferenz des Prozeßgrößenreglers. Da der Prozeßgrößenregler üblicherweise als Proportional-Integralregler (PI-Regler)

geschaltet ist, begrenzt der Limitierer den Gradienten für die integrale Verstellung der Stellgröße. Wird der Begrenzer auf den Grenzwert null gestellt, verändert sich die Stellgröße des Prozeßgrößenreglers überhaupt nicht mehr.

[0037] Über eine weitere Signalleitung können die obere und untere Grenze des Begrenzers in Abhängigkeit von einer Prozeßgröße variiert werden. Hierbei wird die Regeldifferenz des Pumpgrenzreglers als Stellgröße verwendet. Ein Funktionsgeber gestattet die Definition eines nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Regeldifferenz des Pumpgrenzreglers und den wirksamen Grenzen des Begrenzers. Der Funktionsgeber kann z. B. derart eingestellt sein, daß bei einer Regeldifferenz größer 20 % keinerlei Begrenzung wirksam ist, bis zu einer Regeldifferenz von 3 % kann die Begrenzung quadratisch mit der Regeldifferenz abnehmen und bei einer Regeldifferenz unter 3 % die untere Grenze auf null stellen. Jeder andere, auch nichtlineare Funktionsverlauf ist bei Bedarf einstellbar. Die obere und untere Grenze sind auch getrennt variabel gestaltbar. In diesem Fall werden zwei Funktionsgeber getrennt für die obere und die untere Grenze verwendet.

[0038] Statt einer Begrenzung der Regeldifferenz kann der Funktionsgeber auch direkt auf die Regelparameter des Prozeßgrößenreglers einwirken und diese entsprechend anpassen.

[0039] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird dem Regler (Prozeßgrößenregler oder Pumpgrenzregler) ein Gradientenbegrenzer nachgeschaltet. Eine Signalleitung überträgt die Ausgangsgröße des Reglers (Prozeßgrößenregler oder Pumpgrenzregler) zum Eingangverstärker eines Gradientenbegrenzers. Dieser Verstärker ist auf eine hohe Verstärkung eingestellt, so daß auch bei einer geringen Abweichung zwischen dem Ausgang des Reglers und dem Ausgang des Gradientenbegrenzers, rückgekoppelt über eine zusätzliche Signalleitung, der Begrenzer ein großes Eingangssignal erhält. Die Grenzwerte des Begrenzers bestimmen den Gradienten für die Verstellung des Integrators. Ist der Begrenzer auf kleine Werte eingestellt, erhält der Integrator nur kleine Eingangswerte und verstellt seinen Ausgang auch bei einer Abweichung am Eingang des Verstärkers nur langsam.

[0040] Über eine weitere Steuerleitung können die Grenzwerte des Begrenzers in gleicher Weise angepaßt werden wie dies zuvor für die Begrenzung der Regeldifferenz des Pumpgrenzreglers beschrieben wurde.

[0041] Bei einer Begrenzung des Gradienten im Ausgang des Reglers ist durch sekundäre Maßnahmen sicherzustellen, daß der Ausgang des Gradientenbegrenzers nicht unzulässig vom Ausgang des Reglers abweicht. Im Regelfall ist der Reglerausgang beim Eingreifen der ausgangsseitigen Gradientenbegrenzung auf den Ausgang des Begrenzers nachzuführen.

[0042] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung

kann an der Ausgangsleitung der Hochdruckstufe der jeweilige Enddruck von einem Druckmeßumformer aufgenommen werden und an einen zusätzlichen Soll-Ist-Wert-Vergleicher übertragen werden, wobei über einen weiteren Prozeßgrößenregler die Stellantriebe der Leitschaukeln jeder der drei Verdichterstufen angesprochen werden können.

[0043] Darüber hinaus kann hinter jeder Verdichterstufe der aktuelle Druck von einem Meßumformer aufgenommen werden und einem Soll-Ist-Wert-Vergleicher zugeführt werden. Parallel dazu werden Regelparameter zwischen der Maximalauswahl und dem Pumpgrenzregler abgezweigt und einem Funktionsgeber zugeführt. Dieser überträgt seine Daten auf den oben genannten zusätzlichen Prozeßgrößenregler. Schließlich kann zwischen dem Funktionsgeber und dem Prozeßgrößenregler ein zusätzlicher Begrenzer angeordnet werden, der nur speziell ausgewählte Regelgrößen weiterleitet.

[0044] Die Erfindung wird anhand von schematischen Ausführungsbeispielen näher beschrieben.

[0045] Es zeigen:

Fig. 1 ein Schaltbild zur Reglerentkopplung eines dreistufigen Turboverdichters von Prozeßgasen,

Fig. 2 ein Schaltbild mit einer zwischengeschalteten Konstante zwischen einem Soll-/Ist-Wert-Vergleicher und einem Pumpgrenzregler,

Fig. 3 ein Schaltbild zur Begrenzung des Gradienten für die Stellgrößenveränderung,

Fig. 4 ein Schaltbild eines Gradientenbegrenzers nach einem Prozeßgrößen- oder Pumpgrenzreglers,

Fig. 5 ein Schaltbild entsprechend Fig. 1 mit einem an der Druckleitung angeordneten Druckmeßumformer,

Fig. 6 ein Schaltbild einer Turboverdichterstufe, bei dem Daten aus der Maximalauswahl zusätzlich einem Prozeßgrößenregler übertragen werden,

Fig. 7 ein Schaltbild einer Turboverdichterstufe, bei dem Daten aus der Maximalauswahl einem Begrenzer und danach einem Prozeßgrößenregler übertragen werden.

[0046] Fig. 1 zeigt eine Anordnung zur Reglerentkopplung eines dreistufigen Turboverdichters, bei dem jede Verdichterstufe (2, 22, 42) eigene Pumpgrenzregelventile (5, 25, 45) aufweist, die jeweils in die Ansaugleitungen (1, 21, 41) der eigenen Verdichterstufe (2, 22,

42) abblasen.

[0047] Ein Maschinenstrang zur Kompression von Gas besteht aus drei in Strömungsrichtung hintereinander angeordneten Stufengruppen (2, 22, 42). Der dreistufige Verdichter besteht jeweils aus den Ansaugleitungen (1, 21, 41), dem Niederdruckverdichter (2), dem Mitteldruckverdichter (22) und dem Hochdruckverdichter (42), den Druckleitungen (3, 23, 43), den Umblaseleitungen (4, 24, 44) mit den Pumpgrenzregelventilen (5, 25, 45), den Durchflußrechnern (6, 26, 46) zur Berechnung des Ansaugdurchflusses sowie dem Rechner (7, 27, 47) für den minimal zulässigen Solldurchfluß, der aus dem Enddruck bzw. der Förderhöhe ermittelt wird. Zur Berechnung der Förderhöhe wird auch der jeweilige Ansaugdruck und die Ansaugtemperatur benötigt. Die zugehörigen Wirkleitungen sind nicht dargestellt.

[0048] Die Rechner (6, 7), (26, 27) und (46, 47) sind über Signalleitungen (8 und 9), (28 und 29) sowie (48 und 49) mit den Förderrohrleitungen und jeweils über zwei weitere Signalleitungen (10 und 11), (30 und 31) sowie (50 und 51) mit den Vergleichern (12, 32 und 52) verbunden. Jeder Vergleichler (12, 32, 52) ermittelt die Differenz aus Sollwert (Förderhöhe) minus Istwert (Durchfluß) und bewirkt immer dann, wenn der Istwert im Verhältnis zum Sollwert zu klein ist, eine graduelle Öffnung der entsprechenden Pumpgrenzregelventile (5, 25 bzw. 45), bis der Istdurchfluß genau dem von der jeweiligen Förderhöhe abhängigen Solldurchfluß entspricht. Die Verstellung erfolgt über eine Maximalauswahl (14, 34, 54), den Pumpgrenzregler (15, 35, 55) sowie die Signalleitungen (16, 36, 56) zum Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45). Die Rückschlagklappe (17, 37) entkoppelt den Niederdruckkompressor (2) vom Mitteldruckkompressor (22).

[0049] Die Meßwerte/Signale des Soll-/Ist-Wertvergleiches (12, 32, 52) wirken über die Steuerleitung (13, 33, 53) direkt auf den Pumpgrenzregler (15, 35, 55), der das Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45) über die Steuerleitung (16, 36, 56) verstellt.

[0050] Ist der Istdurchfluß kleiner als der von der Förderhöhe abhängige Solldurchfluß, wird die Regeldifferenz positiv und verstellt den Ausgang des Pumpgrenzreglers (15, 35, 55) in Richtung eines weiteren öffnenden Ventils (5, 25, 45).

[0051] Den Pumpgrenzreglern (15, 35, 55) wird dabei eine Maximalauswahl (14, 34 und 54) vorgeschaltet, deren einer Eingang die bekannte Differenz aus Sollwert und Istwert der zugehörigen Pumpgrenzregelung der Kompressorstufe ist. Dieser Maximalauswahl wird die Regeldifferenz der anderen Soll-/Ist-Wertvergleichler (32 und 52) ebenfalls aufgeprägt. Die Wirkung der Regeldifferenz ist derart, daß ein positives Signal den Reglerausgang (15, 35, 55) sinken läßt und damit das Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45) öffnet und ein negatives Signal das Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45) schließt. Die Maximalauswahl (14, 34, 54) bewirkt nun, daß immer dann, wenn eine der drei Verdichterstufen

(2, 22 oder 42) in einen Betriebsbereich gelangt, der ein Öffnen des Pumpgrenzregelventils (5, 22 oder 42) verlangt, diese Größe allen drei Pumpgrenzreglern (15, 35 und 55) aufgeprägt werden und jeder Pumpgrenzregler (15, 35 oder 55) sein zugehöriges Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45) über die Steuerleitung (16, 36, 56) entsprechend öffnet. Eine wechselseitige Beeinflussung ist dadurch verhindert, da alle Pumpgrenzregelventile (5, 25, 45) gleichzeitig und bei gleicher Reglereinstellung auch um den gleichen Betrag öffnen.

[0052] Haben alle drei Verdichterstufen (2, 22, 42) den gefährlichen Arbeitsbereich, in dem der Durchfluß geringer als zulässig ist, durch Öffnen der Pumpgrenzregelventile (5, 25, 45) wieder verlassen, schalten die Maximalauswahlglieder (14, 34 und 54) jeweils die Regeldifferenz auf den Pumpgrenzregler (15, 35, 55), die das Pumpgrenzregelventil (5, 25, 45) mit dem kleinsten Gradienten schließt.

[0053] Entsprechend Fig. 2 kann zwischen den Soll-/Ist-Wert-Vergleichern (12, 32 und 52) sowie der Maximalauswahl (14, 34 und 54) ein Ergänzungsbaustein zwischengeschaltet werden.

[0054] Die im Soll-/Ist-Wert-Vergleicher (12) ermittelte Regeldifferenz wird über die Signalleitung (60) einem Verzögerungsglied erster Ordnung (61) und einem addierenden Begrenzer (63) aufgeschaltet. Dieser Begrenzer (63) addiert die Eingänge vorzeichengerecht, d. h. er subtrahiert von der Regeldifferenz die über Verzögerungsglied (61) verzögerte Regeldifferenz. Im stationären Zustand ist diese Differenz null, so daß der Addierer (64) lediglich das Signal der Maximalauswahl (14) weitergibt. Der Begrenzer (63) ist auf einen Bereich von 0 bis 1 eingestellt, er begrenzt negative Werte auf den Wert null.

[0055] Sollte sich nun der Arbeitspunkt auf die Regellinie zubewegen, folgt das Ausgangssignal (60.2) des Verzögerungsgliedes (61) zeitlich verzögert. Bei einer größeren Änderung der Regeldifferenz kann das Ausgangssignal des Limitierers (63) bereits positiv werden, wenn die Regeldifferenz selbst noch negativ ist. Andererseits verschwindet die Wirkung der Korrekturgröße, d. h. der Ausgang des Limitierers (63) wird zu null, wenn die Regeldifferenz stationär einen von null verschiedenen Wert annimmt.

[0056] Zusätzlich kann dem Limitierer (63) noch eine Konstante (62) aufaddiert werden. Diese Konstante (62) bewirkt einen Versatz. Der Ausgang des Begrenzers (63) wird erst dann größer null, wenn die Differenz der beiden anderen Eingangsgrößen (60.1 und 60.2) den als Konstante eingestellten Schwellwert überschritten hat.

[0057] Selbstverständlich kann diese Konstante (62) auch ohne die verzögernde Wirkung des PT1-Gliedes (61) verwendet werden.

[0058] Eine weitere Möglichkeit zur Verhinderung von gegenseitiger Beeinflussung verschiedener Regelkreise besteht darin, den Gradienten für Stellgrößenveränderungen zu begrenzen.

[0059] Entsprechend Fig. 3 wird im Soll-/Ist-Wertvergleicher (12) die Differenz aus aktuellem Kompressordurchfluß und minimal zulässigen Durchfluß gebildet und über eine Signalleitung (60) dem Pumpgrenzregler (15) zugeleitet, der das Pumpgrenzregelventil (5) über die Steuerleitung (16) derart verstellt, daß der Turboverdichter nicht im instabilen Arbeitsbereich betrieben wird.

[0060] Über die Signalleitungen (70 und 71) werden dem Soll-/Ist-Wertvergleicher (72) der Prozeßgrößen-sollwert und der Prozeßgrößenistwert aufgeschaltet. Die Differenz dieser beiden Werte wirkt über die Signalleitung (73) und den Begrenzer (74) auf den Prozeßgrößenregler (78). Dieser Regler verstellt das zugehörige Stellorgan des Turboverdichters (Leitschaufeln, Drosselorgan, Drehzahl) derart, daß der Prozeßgrößen-Istwert genau dem Sollwert entspricht.

[0061] Über die Signalleitung (76) können die obere und untere Grenze des Begrenzers (74) in Abhängigkeit von einer Prozeßgröße variiert werden. Im gezeichneten Fall wird die Regeldifferenz des Pumpgrenzreglers (15) als Stellgröße verwendet. Der Funktionsgeber (75) gestattet die Definition eines nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Regeldifferenz des Pumpgrenzreglers und den wirksamen Grenzen des Begrenzers.

[0062] Der Prozeßgrößenregler (78) reagiert mit seinem eingestellten (als Parametersatz einstellbar) Zeitverhalten auf die Eingangsgröße. Eine große Regeldifferenz am Eingang bewirkt, daß der Regler (78) seine Ausgangsgröße schnell verändert, bei einer kleinen Regeldifferenz am Eingang verändert sich der Ausgang nur langsam. Durch eine gesteuerte Beeinflussung der Regeldifferenz am Eingang des Prozeßgrößenreglers (78) kann das Zeitverhalten der Ausgangsgröße beliebig beeinflusst werden. Durch eine Begrenzung auf null durch den Begrenzer (74) kann eine Veränderung des Reglerausgangs in die eine oder andere Richtung völlig verhindert werden, durch gesteuerte Begrenzung auf positive Werte kann der Reglerausgang (78) sogar in Richtung größerer Ausgangswerte gesteuert werden, selbst wenn die Regeldifferenz am Eingang den Reglerausgang senken will.

[0063] Statt einer gesteuerten Beeinflussung der Regeldifferenz des Prozeßgrößenreglers (78) kann auch vom Funktionsgeber (75) aus über die Steuerleitung (76) direkt auf die Regelparameter, insbesondere die Proportionalverstärkung und die Nachstellzeit, zugegriffen werden. Durch diesen Steuereingriff wird das gleiche bewirkt wie durch den Begrenzer (74) im Eingang des Prozeßgrößenreglers (78).

[0064] Entsprechend Fig. 4 ist dem Regler (15/78) (Pumpgrenzregler (15) oder Prozeßgrößenregler (78)) ein Gradientenbegrenzer (80) nachgeschaltet. Die Signalleitung (79) überträgt die Ausgangsgröße des Reglers (15/78) zum Eingangsverstärker (81). Dieser Verstärker (81) ist auf eine hohe Verstärkung eingestellt, so daß auch bei einer geringen Abweichung zwischen dem Ausgang des Reglers (79) und dem

Ausgang des Gradientenbegrenzers (84) rückgekoppelt über die Signalleitung (85) der Begrenzer (82) ein großes Eingangssignal erhält. Die Grenzwerte des Begrenzers (82) bestimmen den Gradienten für die Verstellung des Integrators (83). Ist der Begrenzer (82) auf kleine Werte eingestellt, erhält der Integrator (83) nur kleine Eingangswerte und verstellt seinen Ausgang (84) auch bei einer Abweichung am Eingang des Verstärkers (81) nur langsam.

[0065] Über die Steuerleitung (86) können die Grenzwerte des Begrenzers (82) in gleicher Weise angepaßt werden wie dies zuvor für die Begrenzung der Regeldifferenz des Reglers (15/78) beschrieben wurde.

[0066] Fig. 5 zeigt ein Schaltbild entsprechend Fig. 1 mit einem an der Druckleitung (43) nach der Rückschlagklappe (57) der dritten Verdichterstufe (42) angeordnetem Druckmeßumformer (20), der Regeldaten über eine Signalleitung (88) auf einen Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12) sowie Prozeßgrößen-Sollwerte (89) vom Leitsystem empfängt.

[0067] Ein Prozeßgrößenregler (78) überträgt die Soll-Ist-Wertvergleiche (Regelgrößen) über eine Steuerleitung (87) an die Stellantriebe (18) zur Verstellung der Leitschaukeln (19) in den Nieder-, Mittel- und Hochdruck-Turboverdichterstufen (2, 22, 42).

[0068] Gemäß Fig. 6 kann in der Druckleitung (3) des Niederdruckkompressors (2) nach der Rückschlagklappe (17) ein Druckmeßumformer (20) angeordnet werden, der über eine Steuerleitung (71) Regeldaten an einen Soll-Ist-Wert-Vergleicher (72) überträgt und diese über eine Signalleitung (73) auf einen Prozeßgrößenregler (78) weiterleitet.

[0069] Von einer Maximalauswahl (14) werden Regeldaten aus dem Soll-Ist-Vergleicher (12) auf einen Funktionsgeber (75) bzw. einen Pumpgrenzregler (15) übertragen, wobei die Maximalauswahl (14) weitere Daten über die Steuerleitung (33) und (35) aus den Mittel- und Hochdruckstufen empfängt.

[0070] Fig. 7 zeigt ein Schaltbild einer Niederdruck-Turboverdichterstufe (2), bei der die Regeldifferenzen des Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12) bzw. aus (33) und (53) zunächst der Maximalauswahl (14) zugeleitet werden. Diese Regeldaten werden, wie bereits in Fig. 6 dargestellt, auf einen Pumpgrenzregler (15) und von dort auf das Pumpgrenzregelventil (5) übertragen.

[0071] Dem Funktionsgeber (75) können darüber hinaus Regeldaten aus der Maximalauswahl (14) über eine Steuerleitung (76) auf einen Begrenzer (74) übertragen werden, der dem Prozeßgrößenregler (78) vorgeschaltet ist. Dieser (78) ist über eine Steuerleitung (87) mit dem Stellantrieb (18) der Leitschaukeln (19) der Niederdruckstufe (2) verbunden.

Bezugsziffernliste:

[0072]

1 Ansaugleitung

2	Niederdruckkompressor
3	Druckleitung
4	Umblaseleitung
5	Abblaseventil/Pumpgrenzregelventil
6	Durchflußrechner
7	Förderhöhenrechner und Sollwertbildner
8	Signalleitungen
9	Signalleitungen
10	Signalleitungen
11	Signalleitungen
12	Soll-/Ist-Wert-Vergleicher
13	Steuerleitung
14	Maximalauswahl
15	Pumpgrenzregler
16	Steuerleitung zu 5
17	Rückschlagklappe
18	Stellantrieb
19	Leitschaukeln
20	Druckmeßumformer
21	Ansaugleitung
22	Mitteldruckkompressor
23	Druckleitung
24	Umblaseleitung
25	Pumpgrenzregelventil
26	Durchflußrechner
27	Förderhöhenrechner und Sollwertbildner
28	Signalleitung
29	Signalleitung
30	Signalleitung
31	Signalleitung
32	Soll-/Ist-Wert-Vergleicher
33	Steuerleitung
34	Maximalauswahl
35	Pumpgrenzregler
36	Steuerleitung zu 25
37	Rückschlagklappe
38	
41	Ansaugleitung
42	Hochdruckkompressor
43	Druckleitung
44	Umblaseleitung
45	Pumpgrenzregelventil
46	Durchflußmesser
47	Förderhöhenrechner und Sollwertbildner
48	Signalleitung
49	Signalleitung
50	Signalleitung
51	Signalleitung
52	Soll-/Ist-Wert-Vergleicher
53	Steuerleitung
54	Maximalauswahl
55	Pmpgrenzregler
56	Steuerleitung zu 56
57	Rückschlagklappe
58	
60	Signalleitung
60.1	positiver Strang
60.2	negativer Strang

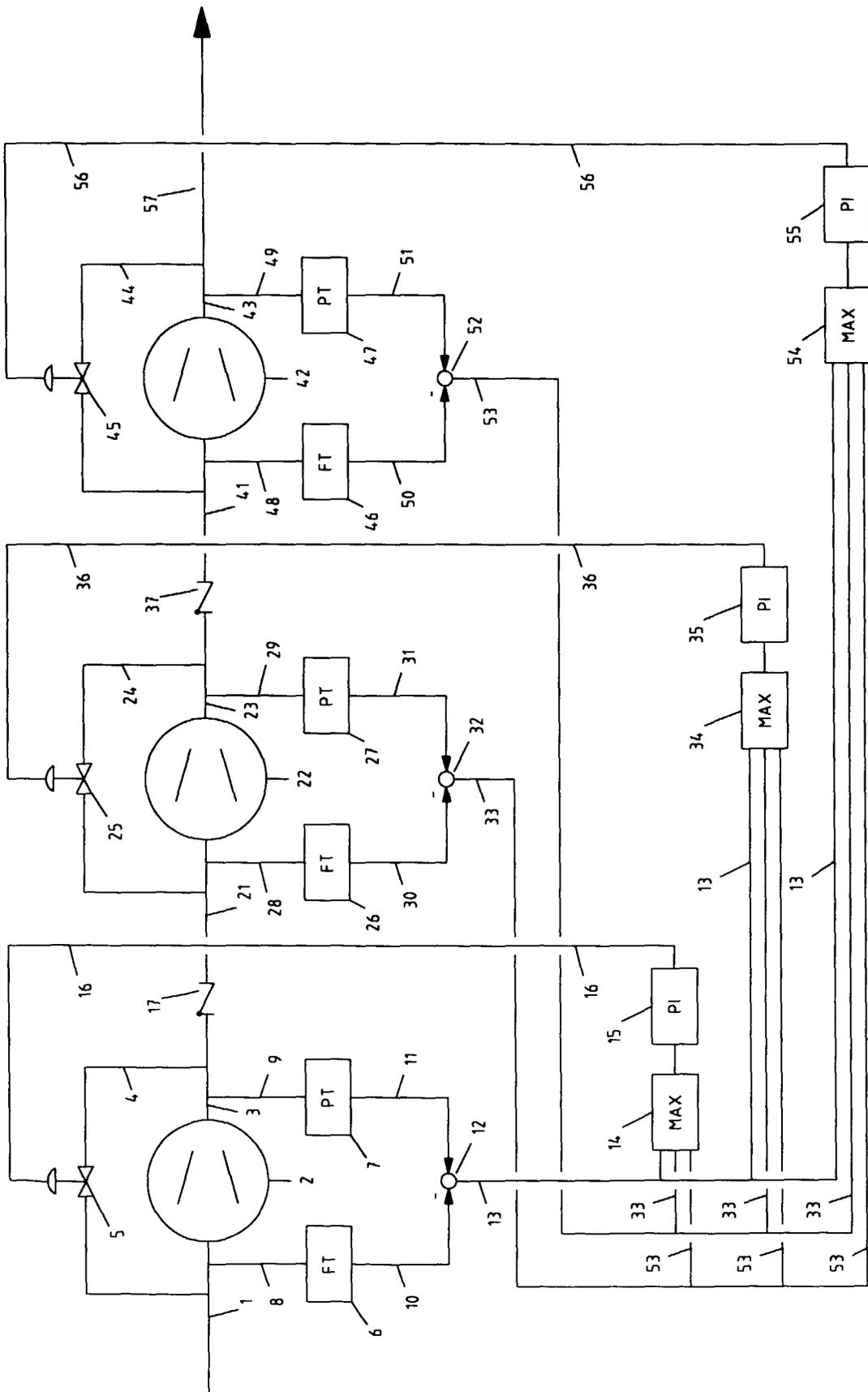
61	Verzögerungsglied, 1. Ordnung
62	Konstante
63	addierender Begrenzer/Limitierer
64	Summierer/Addierer
70	Signalleitung
71	Signalleitung
72	Soll-/Ist-Wert-Vergleicher
73	Signalleitung
74	Begrenzer
75	Funktionsgeber
76	Signalleitung
77	Signalleitung
78	PI-Regler/Prozeßgrößenregler
79	Signalleitung (Reglerausgang)
80	Gradientenbegrenzer
81	Eingangsverstärker
82	Begrenzer
83	Integrator
84	Ausgangsleitung Gradientenbegrenzer
85	Signalleitung für Rückkoppelung
86	Steuerleitung
87	Signalleitung
88	Signalleitung
89	Prozeßgrößen-Sollwerte vom Leitsystem

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben von Turbomaschinen mit mindestens zwei sich gegenseitig beeinflussenden Reglern, dadurch gekennzeichnet, daß wechselseitig ausgetauschte Korrekturgrößen eines ersten und eines zweiten Reglers, wobei der erste Regler ein Pumpgrenzregler ist, in den Soll/Istvergleich der beiden Regler eingreifen und die Stellgrößenausgänge der beiden Regler derart entkoppeln, daß eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen ist oder zumindest deutlich reduziert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Regeldifferenz des ersten Reglers auf eine Extremwertauswahl vor dem zweiten Regler wirkt.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuergröße, die das Pumpgrenzregelventil mit maximaler Stellgrößengeschwindigkeit verstellt, von jedem Regler aus auf jedes Stellorgan wirkt.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die wirksame Korrekturgröße aus der Differenz aus einer über ein Verzögerungsglied erster Ordnung zeitlich verzögerten ursprünglichen Korrekturgröße und der unverzögerten Größe ermittelt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Korrekturgröße ein Offset aufgeprägt wird.
- 5 6. Verfahren nach den Ansprüchen 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrekturgröße den Gradienten für die Verstellung einer Stellgröße eines anderen Reglers begrenzt.
- 10 7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Gradient für die Begrenzung der Stellgröße eine lineare oder nichtlineare Funktion der Korrekturgröße ist.
- 15 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Begrenzung für die Stellgröße, abhängig von einer Prozeßgröße, zu- oder abgeschaltet wird.
- 20 9. Verfahren nach Anspruch 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrekturgröße auf die Reglerparameter wirkt und diese variiert.
- 25 10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens zum Betreiben von mehrstufigen Turboverdichtern mit mindestens zwei sich gegenseitig beeinflussenden Reglern, dadurch gekennzeichnet,
 - daß jedem Pumpgrenzregler (15, 35, 55) einer Turboverdichterstufe (2, 22, 42) eine Maximalauswahl (14, 34, 54) vorgeschaltet ist, in die aus dem Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12, 32, 52) wechselseitig ausgetauschte Korrekturgrößen über Steuerleitungen (13, 33, 53) übertragen werden und
 - daß der Pumpgrenzregler (15, 35, 55) über Steuerleitungen (16, 36, 56) auf die Pumpgrenzregelventile (5, 25, 45) wirkt.
- 40 11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet,
 - daß jedem Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12, 32, 52) des Pumpgrenzreglers (15, 35, 55) jeweils ein Verzögerungsglied erster Ordnung (61) und ein addierender Begrenzer (63) nachgeschaltet wird,
 - daß der Begrenzer (63) die Reglerdifferenzgänge vorzeichengerecht addiert und auf einstellbare Grenzwerte begrenzt und
 - daß der Addierer (64) die ermittelte Reglerdifferenz (Extremwertauswahl) an den Pumpgrenzregler (15, 35, 55) weitergibt.
- 45 55

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Korrekturgröße vor dem Begrenzer (63) eine Konstante (62) aufgeprägt wird. 5
13. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet,
- daß zwischen dem Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12, 32, 52) und dem Begrenzer (74) jeweils ein Funktionsgeber (75) zwischengeschaltet ist bzw. 10
 - daß der Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12, 32, 52) über die Steuerleitung (60) direkt mit dem Pumpgrenzregler (15, 35, 55) verbunden ist, 15
 - daß ein weiterer Soll-Ist-Wert-Vergleicher (72) mit dem Begrenzer (74) gekoppelt ist, der seine Daten an einen Prozeßgrößenregler (78) weiterleitet und
 - daß der Pumpgrenzregler (15) über eine Signalleitung (60) zusätzlich mit dem Funktionsgeber (75) gekoppelt ist. 20
14. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, 25
- daß dem Regler (15 oder 78) ein Gradientenbegrenzer (80) nachgeschaltet ist, wobei die Daten des Reglers (15 oder 78) auf einen Eingangsverstärker (81) übertragen werden, 30
 - daß der Eingangsverstärker (81) mit einem Begrenzer (82) und dieser mit einem Integrator (83) verbunden ist und
 - daß dem Eingangsverstärker (81) die Ausgangsdaten (84) über eine Steuerleitung (85) rückübertragen werden. 35
15. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, 40
- daß an der Druckleitung (43) ein Druckmeßumformer (20) angeordnet ist, der Daten über eine Signalleitung (88) auf einen Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12) überträgt,
 - daß ein Prozeßgrößenregler (78) die Soll-Ist-Wertvergleiche (Regelgrößen) über eine Steuerleitung (87) an den Stellantrieb (18) zur Verstellung der Leitschaufeln (19) in den Turboverdichterstufen (2, 22, 42) überträgt und 45
 - daß dem Soll-Ist-Wert-Vergleicher (20) Prozeßgrößen Soll-Werte (89) vom Leitsystem übertragen werden. 50
16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, 55
- daß an der Druckleitung (3) nach der Rückschlagklappe (17) ein Druckmeßumformer (20)
- angeordnet ist, der über eine Steuerleitung (71) Daten an einen Soll-Ist-Wert-Vergleicher (72) überträgt und diese über eine Signalleitung (73) auf einen Prozeßgrößenregler (78) weiterleitet,
- daß eine Maximalauswahl (14) Daten aus dem Soll-Ist-Wert-Vergleicher (12) auf einen Funktionsgeber (75) bzw. einen Pumpgrenzregler (15) überträgt,
 - daß die Maximalauswahl (14) weitere Daten über die Steuerleitung (33) und (35) empfängt,
 - daß der Pumpgrenzregler (15) über eine Steuerleitung (16) mit dem Pumpgrenzregelventil (5) verbunden ist,
 - daß die Daten über eine Steuerleitung (76) dem Prozeßgrößenregler (78) übertragen werden und
 - daß der Prozeßgrößenregler (78) seine Daten über eine Signalleitung (87) auf den Stellantrieb (18) der Leitschaufeln (19) in den Turboverdichterstufen (2, 12, 42) überträgt.
17. Vorrichtung nach den Ansprüchen 15 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß der Funktionsgeber (75) Daten aus der Maximalauswahl (14) über eine Steuerleitung (76) auf einen Begrenzer (74) überträgt, der dem Prozeßgrößenregler (78) vorgeschaltet ist.



Figur 1

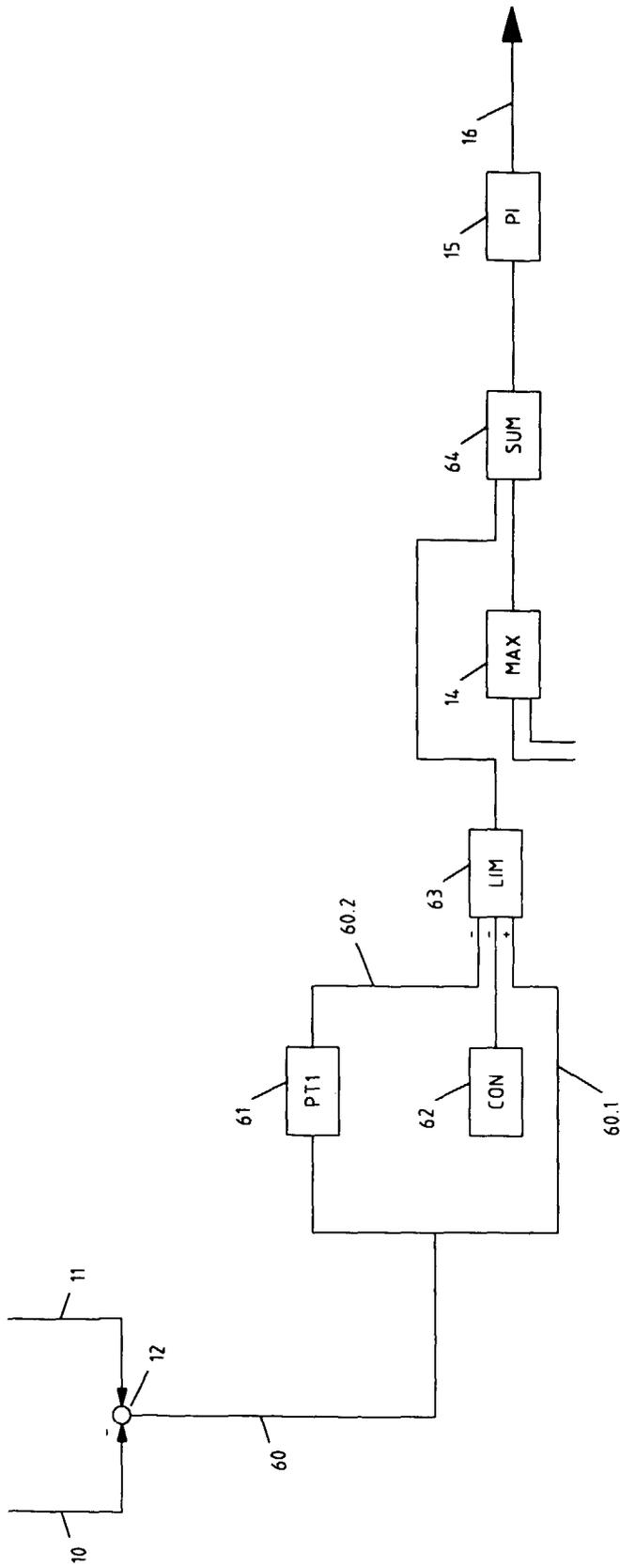
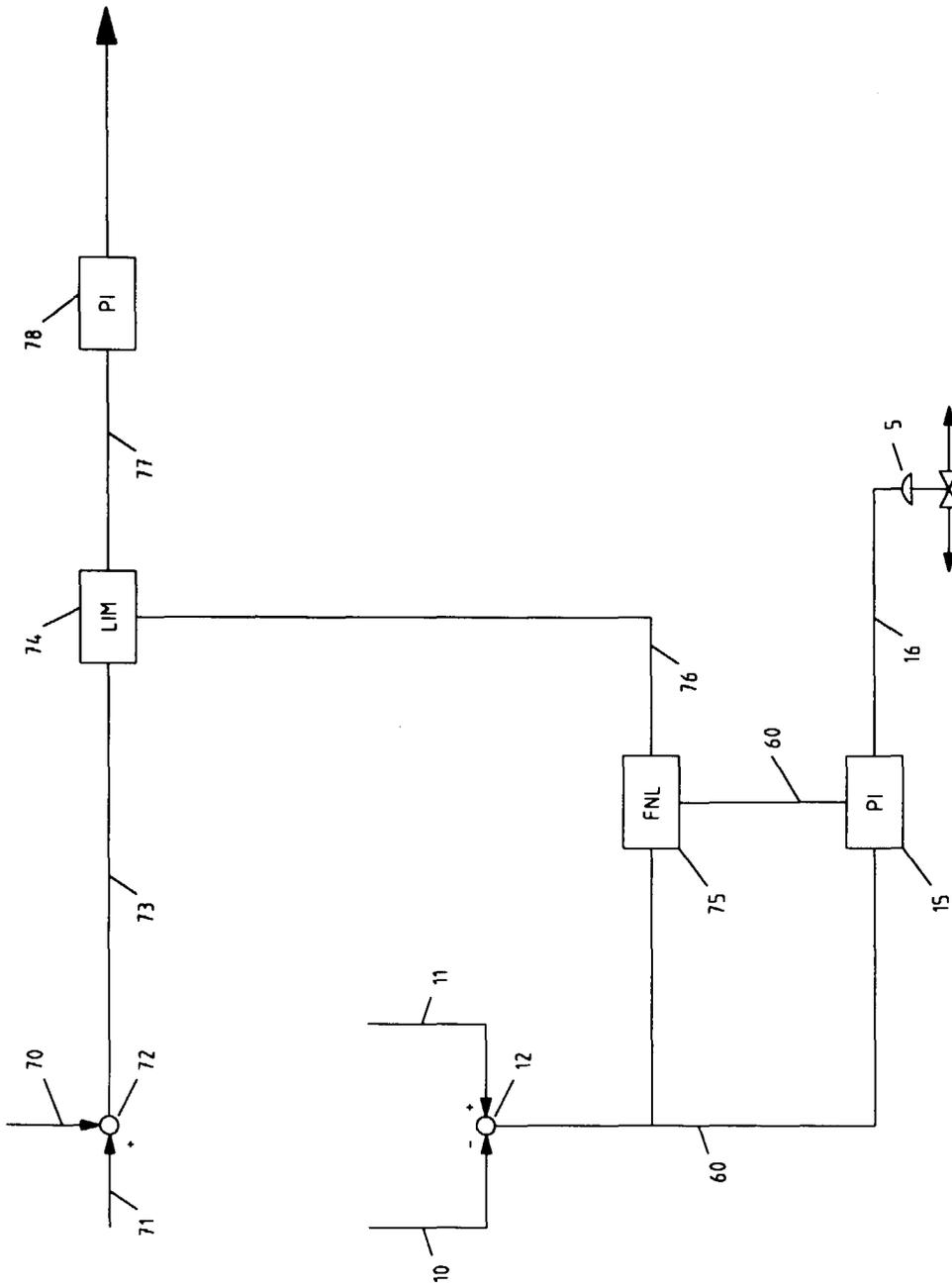
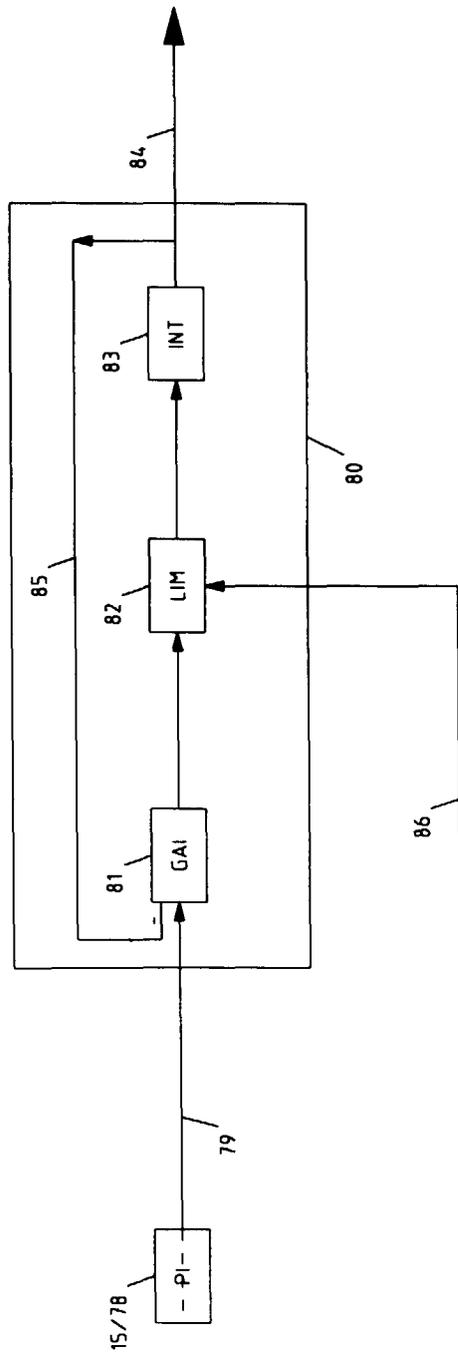


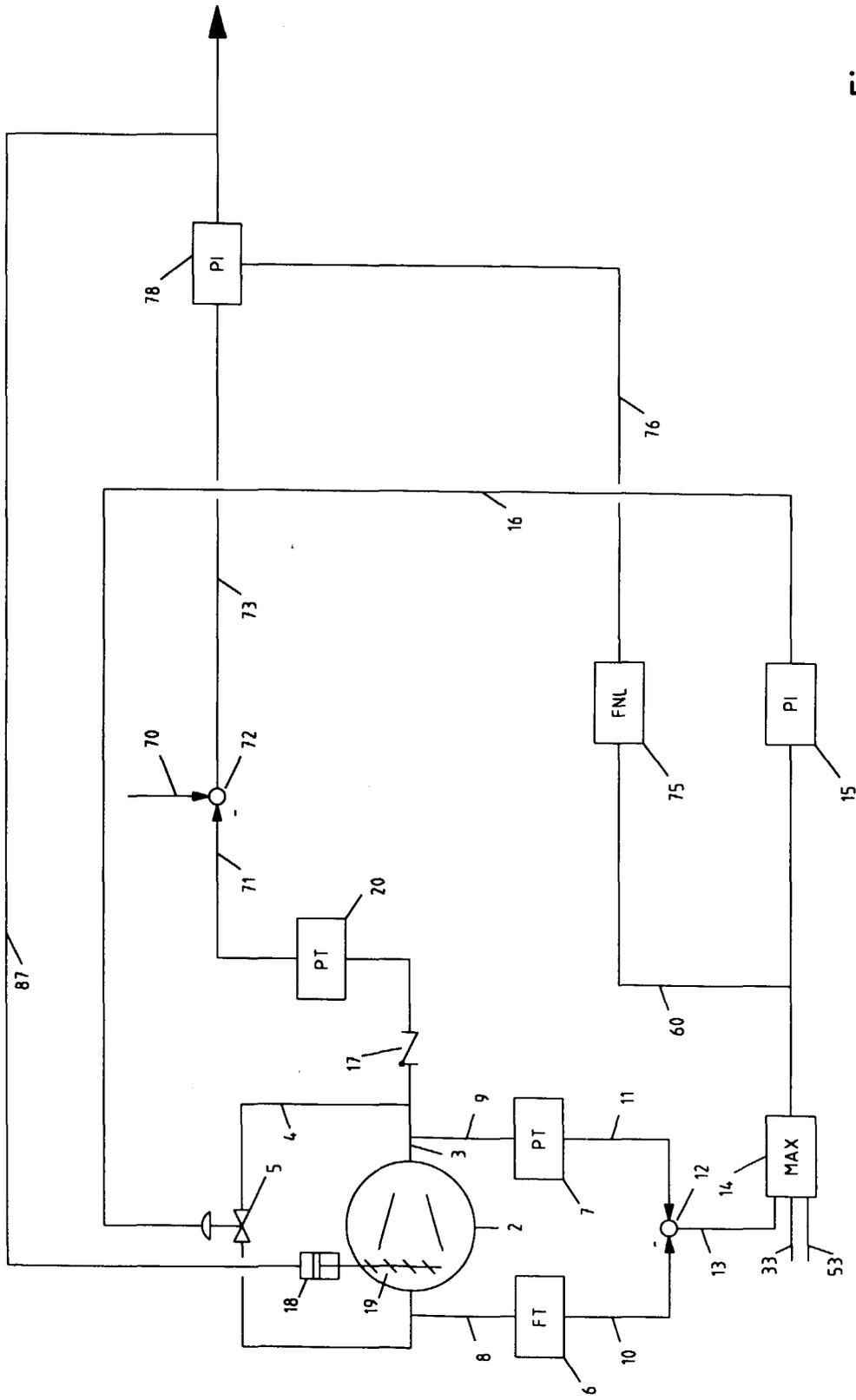
Figure 2



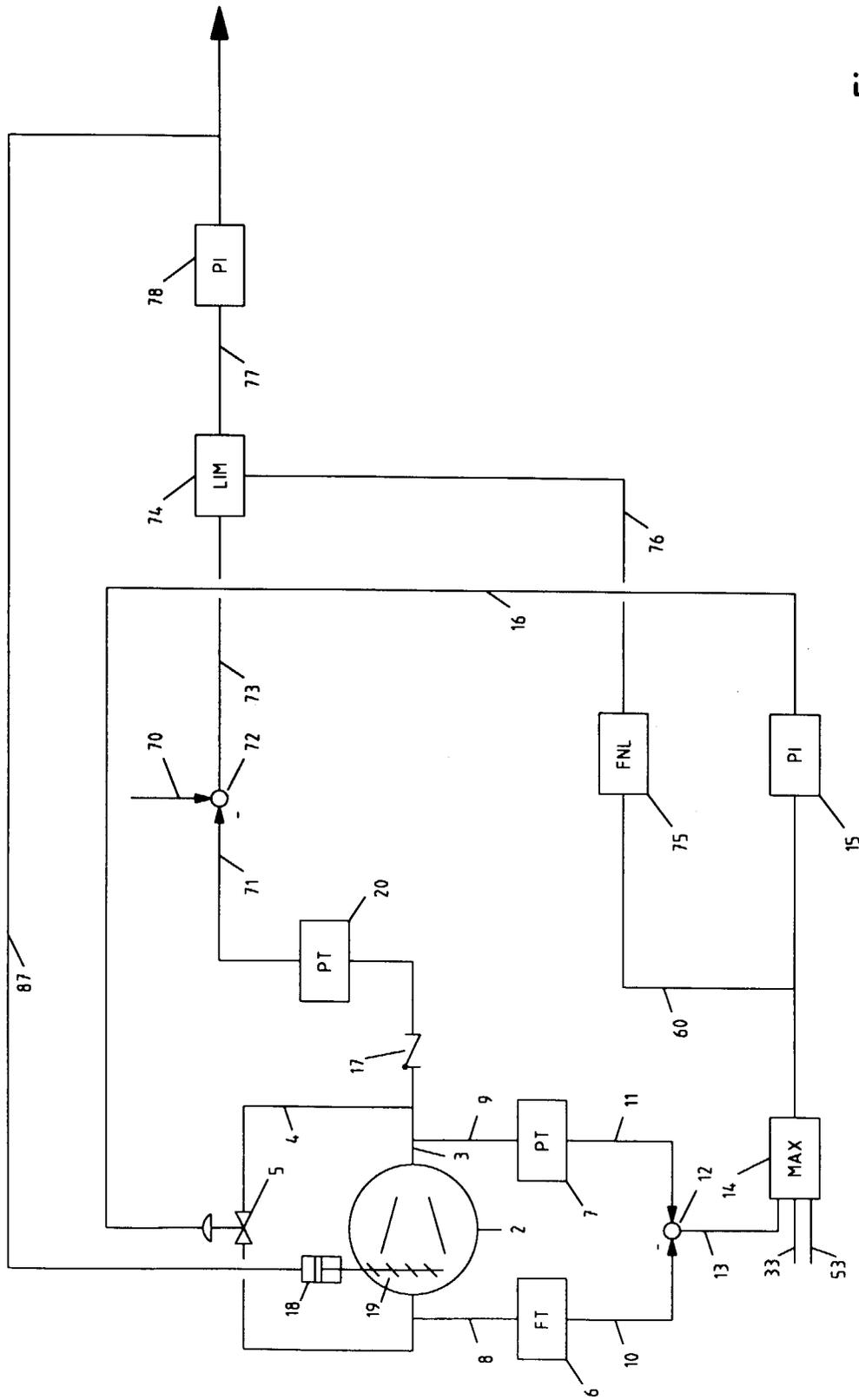
Figur 3



Figur 4



Figur 6



Figur 7