

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 258/2014
 (22) Anmeldetag: 07.04.2014
 (43) Veröffentlicht am: 15.11.2014

(51) Int. Cl.: **F04B 49/00** (2006.01)

(30) Priorität:
 10.04.2013 DE 102013006137.7 beansprucht.

(71) Patentanmelder:
 ROBERT BOSCH GMBH
 70442 STUTTGART (DE)

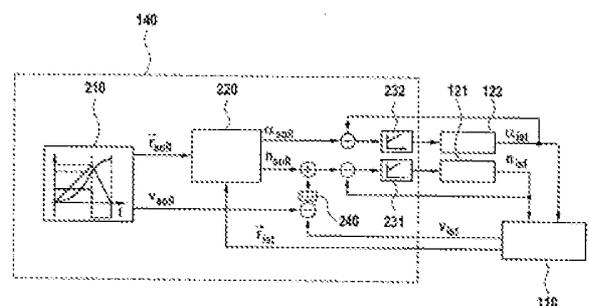
(72) Erfinder:
 Willkomm Johannes
 63739 Aschaffenburg (DE)
 Wahler Matthias
 97450 Müdesheim (DE)

(74) Vertreter:
 PATENTANWÄLTE PUCHBERGER, BERGER
 & PARTNER
 WIEN

(54) **Regelung drehzahlvariabler Verstellpumpen mittels modellbasierter Optimierung**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung einer Druckmittelzufuhr für mindestens einen hydraulischen Aktor (110), der von einer drehzahlvariablen Verstellpumpe, bei der ein in einem Verdrängervolumen je Arbeitsspiel verstellbares Förderwerk (122) von einem drehzahlvariablen Antrieb (121) angetrieben wird, mit einer Druckmittelmenge versorgt wird, die durch ein vorgegebenes Druck- und/oder Volumenstrom-Profil bestimmt ist, wobei ein Drehzahl Sollwert (n_{Soll}) und ein Sollwert (α_{Soll}) für die das Verdrängervolumen je Arbeitsspiel bestimmende Kenngröße für einen Verfahrensablauf vorgegeben werden, indem ein modellbasiertes Optimierungsproblem, das durch eine Zielfunktion für den Verfahrensablauf vorgegeben wird, gelöst wird.

Fig. 2



5

Regelung drehzahlvariabler Verstellpumpen mittels modellbasierter Optimierung

Beschreibung

10

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung einer Druckmittelzufuhr für mindestens einen hydraulischen Aktor sowie eine Recheneinheit zu dessen Durchführung.

Stand der Technik

15

Der Erfindung zugrunde liegende Pumpen bestehen aus einem Förderwerk mit variablem Verdrängervolumen pro Arbeitsspiel (sog. hydraulische Verdrängermaschine, z.B. Radialkolben- oder Axialkolbenmaschine), welches von einem Antrieb mit variabler Drehzahl angetrieben wird. Beim Betrieb solcher Pumpen werden üblicherweise der Volumenstrom und/oder der Förderdruck (d.h. Druckdifferenz zwischen Zulauf und Ablauf) durch entsprechende Anpassung des Verdrängervolumens des Förderwerks und der Drehzahl geregelt, d.h. solche Pumpen besitzen zwei Freiheitsgrade bei der Regelung.

20

In der Praxis hat es sich als problematisch erwiesen, eine solche Pumpe im gegebenen Anwendungsfall, d.h. also zum Betrieb eines Aktors in einer – insbesondere zyklisch arbeitenden – Maschine, optimal zu betreiben.

25

In der EP 1 236 558 B1 wird vorgeschlagen, die Drehzahl des Antriebs (hier Elektromotors) an den angeforderten Druck oder den angeforderten Volumenstrom anzupassen. Dafür wird in einem Lernzyklus ein Drehzahl-Profil erstellt. Dieses Drehzahl-Profil wird verwendet, um die Drehzahl während des Ablaufs der Arbeitszyklen zu verändern. Zur Erstellung des Drehzahl-Profiles wird in einem Lernzyklus bei konstanter Drehzahl des Elektromotors zunächst ein Verdrängervolumen-Profil für eine Verstellpumpe erfasst. Im Anschluss daran wird aus der konstanten Drehzahl und dem Verdrängervolumen-Profil ein Volumenstrombedarf-Profil

30



ermittelt. Aus dem Volumenstrombedarf-Profil wird schließlich das Drehzahl-Profil bei einem konstanten Verdrängervolumen der Verstellpumpe ermittelt. In der DE 10 2009 018 071 A1 wird zusätzlich ein Grenzverdrängervolumen berücksichtigt, das bei einer Drehzahlabsenkung nicht überschritten werden soll.

5

In der DE 10 2011 119 299 A1 wird ein Regelverfahren beschrieben, bei dem durch Drehzahlvorsteuerung die Dynamik einer Drehzahländerung erhöht wird, um so einem Förderdruckabfall bei großen Mengenänderungen entgegenzuwirken.

- 10 Es bleibt wünschenswert, den Betrieb einer drehzahlvariablen Verstellpumpe möglichst flexibel an unterschiedliche Anwendungsfälle anpassen zu können.

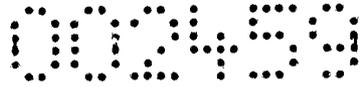
Offenbarung der Erfindung

- 15 Erfindungsgemäß werden Verfahren zur Regelung einer Druckmittelzufuhr für mindestens einen hydraulischen Aktor sowie eine Recheneinheit zu dessen Durchführung mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche vorgeschlagen. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der nachfolgenden Beschreibung.

- 20 Vorteile der Erfindung

Die Erfindung erlaubt, die Druckmittelzufuhr für mindestens einen hydraulischen Aktor mittels einer drehzahlvariablen Verstellpumpe sehr flexibel an unterschiedliche Anwendungsfälle anpassen zu können, indem eine modellbasierte Sollwertvorgabe für die Pumpe erfolgt.

- 25 Die Sollwerte für die Ansteuerung der drehzahlvariablen Verstellpumpe werden bestimmt bzw. berechnet, indem ein modellbasiertes Optimierungsproblem, das durch eine Zielfunktion vorgegeben wird, insbesondere unter Nebenbedingung gelöst wird. Wesentlich ist dabei, dass die Zielfunktion für einen Verfahrensablauf (gekennzeichnet durch Sollwert-Trajektorie) und nicht nur für einen Arbeitspunkt vorgegeben wird. Insbesondere werden dafür in der
- 30 Zielfunktion dynamische Verluste, die von einer Veränderung des Drehzahlsollwerts oder des Sollwerts für die das Verdrängervolumen je Arbeitsspiel bestimmende Kenngröße verursacht werden, berücksichtigt.

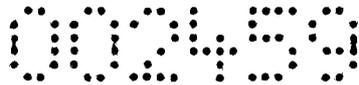


Die modellbasierte Optimierung an sich ist bekannt. Dabei wird ein Extremum einer Zielfunktion bzw. Gütefunktion ermittelt. Die Zielfunktion wird aus einem Modell des zugrunde liegenden Systems abgeleitet.

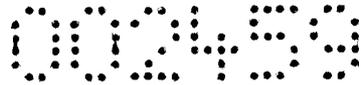
- 5 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das modellbasierte Optimierungsproblem im Rahmen einer modellprädiktiven Regelung (auch als Model Predictive Control - MPC bezeichnet) gelöst.

10 Auch die modellprädiktive Regelung an sich ist bekannt. Es handelt sich dabei um ein Regelungsverfahren, das sich insbesondere zur Regelung nichtlinearer Systeme mit mehreren Stellgrößen und zur Berücksichtigung von Beschränkungen bzw. Nebenbedingungen eignet. Zusätzlich zur einmaligen Lösung des Optimierungsproblems wird nun in jedem Zeitschritt der aktuelle Prozess-Istzustand bzw. Istzustand des Aktors (z.B. Geschwindigkeit, Position) gemessen und die Optimierungsaufgabe mit den aktuellen Bedingungen als Eingangssignale
15 neu gelöst. Es wird ein zeit-diskretes dynamisches Modell des zu regelnden Prozesses verwendet, um die zukünftigen Zustände des Prozesses in Abhängigkeit von den Eingangssignalen zu berechnen und aufgrund dieser Vorhersage geeignete Eingangssignale zu wählen. Dies ermöglicht die Berechnung des - im Sinne der Zielfunktion - optimalen Eingangssignales unter der gleichzeitigen Berücksichtigung von Eingangs- und Zustandsbeschränkungen.
20 Während das Modellverhalten bis zu einem bestimmten Zeithorizont N prädiziert wird, wird in der Regel nur das Eingangssignal für den nächsten Zeitschritt verwendet und danach die Optimierung wiederholt. Dabei wird die Optimierung im nächsten Zeitschritt mit dem dann aktuellen (gemessenen) Prozess-Istzustand durchgeführt, was als eine Rückkopplung aufgefasst werden kann und die MPC im Gegensatz zu Optimalsteuerungen zu
25 einer Regelung macht. Dies erlaubt die Berücksichtigung von Störungen.

Vorteilhafte Zielfunktionen bei der Regelung einer Druckmittelzufuhr sind ein möglichst energiesparender (d.h. mit optimiertem Wirkungsgrad) Betrieb und ein möglichst dynamischer, d.h. der Vorgabe möglichst exakt folgender, Betrieb. Um einen möglichst energiesparenden Betrieb zu verwirklichen, bedient sich die modellbasierte Optimierung vorzugsweise
30 eines Verlustmodells von Antrieb, Förderwerk und Aktor, das in Abhängigkeit von Drehzahl und Schwenkwinkel formuliert ist und minimiert wird. Um einen möglichst dynamischen Betrieb zu verwirklichen, bedient sich die modellbasierte Optimierung vorzugsweise eines Bewegungsmodells des Aktors, um eine Abweichung zwischen einer Soll-Bewegung und einer



- Ist-Bewegung (also eine Regeldifferenz) zu minimieren. Vorteilhafterweise wird eine kombinierte Zielfunktion bereitgestellt, in die die beschriebenen Zielfunktionen jeweils anteilig eingehen. In die kombinierte Zielfunktion gehen sowohl Energieverluste als auch die Regeldifferenz als Kosten ein. Bei langsamen Bewegungen wird diese Variante im Prinzip der energie-
- 5 sparenden Regelung entsprechen, da die Regeldifferenz quasi verschwinden wird. Bei hoch dynamischen Bewegungen wird die Regeldifferenz jedoch dominant. Bei der kombinierten Optimierung kann auch eine unterschiedliche Gewichtung der Kosten (Energieverluste und Regeldifferenz) erfolgen, um die Regelung an die vorliegenden Bedürfnisse anzupassen.
- 10 Mögliche vorteilhafte Nebenbedingungen ergeben sich beispielsweise aus den konstruktiven Gegebenheiten der Maschine und können eine maximale Antriebsdrehzahl, ein maximales Drehmoment, eine maximale Beschleunigung des Antriebs, eine maximale Verstellgeschwindigkeit des Förderwerks (z.B. Schwenkgeschwindigkeit einer Schwenkscheibe), eine maximale Geschwindigkeit des Aktors usw. umfassen.
- 15 Zur Implementierung der modellbasierten Optimierung Regelung ist es zweckmäßig, das zu lösende Optimierungsproblem in eine Standardform zu transformieren, um gängige Solver anwenden zu können. Es hat sich hierbei als vorteilhaft erwiesen, die Zielfunktion als quadratisches Kriterium auszudrücken, so dass das resultierende Optimierungsproblem als quadratisches Programm (QP) behandelt werden kann. Besonders vorteilhaft wird das resultierende
- 20 Optimierungsproblem als quadratisches Programm mit einer oder mehreren quadratischen Nebenbedingungen (englisch: Quadratically Constrained Quadratic Programming - QCQP) behandelt.
- 25 Eine erfindungsgemäße Recheneinheit, z.B. ein Steuergerät einer drehzahlvariablen Verstellpumpe, ist, insbesondere programmtechnisch, dazu eingerichtet, ein erfindungsgemäßes Verfahren durchzuführen.
- 30 Auch die Implementierung der Erfindung in Form von Software ist vorteilhaft, da dies besonders geringe Kosten ermöglicht, insbesondere wenn eine ausführende Recheneinheit noch für weitere Aufgaben genutzt wird und daher ohnehin vorhanden ist. Geeignete Datenträger zur Bereitstellung des Computerprogramms sind insbesondere Disketten, Festplatten, Flash-Speicher, EEPROMs, CD-ROMs, DVDs u.a.m. Auch ein Download eines Programms über Computernetze (Internet, Intranet usw.) ist möglich.



Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der beiliegenden Zeichnung.

- 5 Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachfolgend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.
- 10 Die Erfindung ist anhand eines Ausführungsbeispiels in der Zeichnung schematisch dargestellt und wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnung ausführlich beschrieben.

Figurenbeschreibung

15

Figur 1 zeigt einen Ausschnitt einer hydraulischen Maschine, die erfindungsgemäß betrieben werden kann.

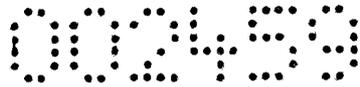
Figur 2 zeigt einen Regelkreis gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung.

20

Detaillierte Beschreibung der Zeichnung

In Figur 1 ist ein Ausschnitt einer hydraulischen Maschine 100, wie sie der Erfindung zu Grunde liegenden kann, schematisch dargestellt. Die hydraulische Maschine weist einen als
25 Hydraulikzylinder 110 mit einem entlang einer x-Achse beweglichen Kolben 111 ausgebildeten Aktor auf, der von einer drehzahlvariablen Verstellpumpe 120 betätigt wird. Zwischen der drehzahlvariablen Verstellpumpe 120 und dem Hydraulikzylinder 110 ist ein Hydraulikkreislauf 130 angeordnet.

- 30 Die drehzahlvariable Verstellpumpe 120 weist einen als Elektromotor 121 ausgebildeten Antrieb und ein als Axialkolbenpumpe in Schwenkscheibenbauweise ausgebildetes Förderwerk 122 auf. Ein Steuergerät 140 ist programmtechnisch zur Durchführung einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet und gibt eine Soll-drehzahl n_{Soll} sowie einen Sollschenkwinkel α_{Soll} vor. Zur Regelung der Stellgrößen ist je-



weils eine Rückführung der Istwerte n_{Ist} sowie α_{Ist} vorgesehen. Dies kann unter Einsatz herkömmlicher Sensoren bewerkstelligt werden.

In Figur 2 ist ein entsprechender Regelkreis gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung dargestellt, wie er programmtechnisch in dem Steuergerät 140 implementiert sein kann. Der Regelung liegt ein Prozess 210 zu Grunde, der als Verfahrensablauf Bewegungs-Solltrajektorien für den Kolben des Hydraulikzylinders 110 vorgibt. Die Bewegungs-Solltrajektorien sind üblicherweise zeitabhängig und geben ein Bewegungsprofil \vec{r}_{Soll} für den Hydraulikzylinder 110 als Prozess-Sollzustand und eine Geschwindigkeit v_{Soll} vor. Das Bewegungsprofil \vec{r}_{Soll} wird einem Regelglied 220 übermittelt, welches hier eine modellprädiktive Regelung als bevorzugte Implementierung einer modellbasierten Optimierung enthält. Wie weiter unten ausführlicher erläutert, werden im Rahmen der modellprädiktiven Regelung 220 die Soll Drehzahl n_{Soll} sowie der Sollschenkwinkel α_{Soll} bestimmt. Das Bewegungsprofil umfasst insbesondere einen zeitabhängigen Verlauf einer Lage bzw. Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und/oder vom Kolben 111 auszuübenden bzw. zu überwindenden Kraft (sog. Gegenkraft). Bei einem bekannten Prozess kann auch davon ausgegangen werden, dass die Gegenkraft über der Zeit bekannt ist. Somit kann diese unmittelbar in die Optimierung einfließen. Bei im Vorhinein unbekannter Gegenkraft kann diese zur Optimierung der Stellgrößen (Drehzahl, Schwenkwinkel) geschätzt (beispielsweise anhand einer Extrapolation aus vergangenen gemessenen Ist-Kräften) werden.

Die eigentliche Drehzahl- und Schwenkwinkelregelung ist hier jeweils mittels eines PI-Reglers 231 bzw. 232 realisiert, dem ein Regelfehler (Differenz zwischen Sollwert und Istwert) zugeführt wird. Die vom Regler 231 bzw. 232 ausgegebene Stellgröße wirkt auf das entsprechende Element (Antrieb 121 und Förderwerk 122), welche wiederum auf die Regelstrecke (Hydraulikzylinder 110) wirken. Von dort werden die Istwerte des Bewegungsprofils \vec{r}_{Ist} als Prozess-Istzustand und der Geschwindigkeit v_{Ist} rückgeführt. Der Istzustand \vec{r}_{Ist} des Hydraulikzylinders 110 (Lage bzw. Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und/oder auf den Kolben wirkende Kraft) geht als Eingangsgröße in die modellprädiktive Regelung 220 ein. Die Ist-Kraft kann entweder mit einem Kraftsensor direkt gemessen oder über ein Modell aus dem bekannten Systemdruck der Pumpe berechnet werden. Bei Spritzgießprozessen ist z.B. üblicherweise ein p/Q-Sollprofil bekannt oder kann zumindest gelernt werden. Der Drehzahlregelkreis kann beispielsweise eine Kaskadenregelung aus Drehzahlregelung und

Drehmomentregelung umfassen, wobei als Stellgröße beispielsweise ein Antriebsstrom für den Elektromotor dient.

5 Zur Korrektur von Modellfehlern und/oder Störgrößen wird der Istwert der Geschwindigkeit v_{Ist} mit dem zugehörigen Sollwert v_{Soll} zu einem weiteren Regelfehler verrechnet, welcher einem Korrekturglied 240 zugeführt wird. Das Korrekturglied berechnet auf Grundlage des Geschwindigkeitsregelfehlers einen Korrekturwert für die von der modellprädiktiven Regelung 220 bestimmte Solldrehzahl n_{Soll} . Das Korrekturglied kann beispielsweise durch einen PI-Regler realisiert werden. Alternativ kann der Korrekturterm auch dem von der modellprädiktiven Regelung 220 bestimmten Sollschenkwinkel α_{Soll} zugeführt werden. Dieser unterlagerte Regelkreis benötigt insbesondere kein Modellwissen und stellt das Folgeverhalten unabhängig von Modellfehlern und/oder Störgrößen sicher. Für die Berechnung des Korrekturgliedes können neben der Geschwindigkeit auch andere Prozessgrößen, wie zum Beispiel der Weg oder der Druck herangezogen werden.

15

Eine alternative, ebenso bevorzugte Ausführungsform kommt ohne die Rückführung des Istzustands \vec{r}_{Ist} aus. In diesem Fall werden die optimalen Werte für Drehzahl und Schwenkwinkel offline (oder einmalig online) bestimmt und dann für den Prozess 210 verwendet. Eine Regelung bzw. Reaktion auf Störungen findet hier weiterhin über das Korrekturglied 240 statt.

20

Innerhalb der modellprädiktiven Regelung 220 können die Sollwerte durch Minimierung eines wirkungsgradoptimierten Modells, eines dynamikoptimierten Modells sowie einer beliebigen Kombination von beiden bestimmt werden.

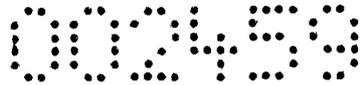
25

Die Bewegungs-Solltrajektorien können in einen äquivalenten Volumenstrom Q_{Soll} und einen äquivalenten Druck p_{Soll} umgerechnet werden, über die Drehzahl, Schwenkwinkel, Lastmoment M und maximales Verdrängervolumen V_{max} pro Umdrehung miteinander verknüpft sind:

$$Q_{Soll} = n_{Soll} \alpha_{Soll} V_{max},$$

$$30 \quad M_{Soll} = p_{Soll} \alpha_{Soll} V_{max} / 2\pi$$

Auf dieser Basis kann zur Durchführung des gegebenen Verfahrensablaufs ein mathematisches Optimierungsproblem mit wahlweise Drehzahl oder Schwenkwinkel als Entsch-



dungsvariable formuliert werden. Für die Lösung dieser Optimierungsaufgabe können zusätzlich Nebenbedingungen formuliert werden (siehe unten). Vorteilhaft ist es, das Optimierungsproblem in eine Standardform zu transformieren, um gängige Solver anwenden zu können. Vorteilhafterweise kann das dynamische Verlustmodell mit Nebenbedingungen als
5 QCQP (Quadratically Constrained Quadratic Programming) Problem formuliert werden.

Für einen hydraulischen Zyklus mit den Vorgaben

$$p(t), Q(t) \quad \text{für } t = 0 \dots T$$

lässt sich die Verlustleistung P_{Verlust} als Funktion von Druck p , Volumenstrom Q , Drehzahl n
10 und Schwenkwinkel α angeben als:

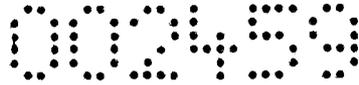
$$P_{\text{Verlust},t} = P_{\text{Verlust},t}(p(t), Q(t), n, \alpha)$$

Bei der Berechnung der Verlustleistung wird das gesamte Antriebssystem bestehend aus Frequenzumrichter, Motor und Pumpe berücksichtigt. Vorzugsweise können weitere Aktoren
15 in die Betrachtung eingeschlossen werden. Als Verluste seien beispielhaft Schaltverluste im Frequenzumrichter, Kupfer-, Eisen- und Reibverluste im elektrischen Antrieb sowie Leckage und Reibung in Pumpe und anderen hydraulischen Komponenten genannt. Das Verlustmodell kann wahlweise auf physikalischen Modellen oder auf experimentell erhobenen Messergebnissen beruhen. Hinsichtlich näherer Details zu Verlusten in zugrunde liegenden Pumpen
20 wird beispielhaft auf die Veröffentlichung "Untersuchungen von drehzahlveränderbaren Pumpen" von Thomas Neubert, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-0538-6, verwiesen. Dort werden jedoch, im Gegensatz zur Erfindung, keine dynamischen Verluste berücksichtigt, wie sie sich bei der Regelung hydraulischer Prozesse mit nicht konstanten Sollwerten für Druck und/oder Volumenstrom ergeben. Für das der Erfindung zugrundeliegende modellbasierte
25 Regelungskonzept werden insbesondere dynamische Verluste und transiente Übergänge berücksichtigt. Diese ergeben sich beispielsweise beim Beschleunigen/Bremsen des Motors oder dem Verstellen des Fördervolumens je Umdrehung der Pumpe..

Daraus ergibt sich als Verlust über den gesamten Verfahrensablauf (Zyklus $t = 0 \dots T$):

$$30 \quad W_{\text{Verlust}} = \sum_{t=0}^T P_{\text{Verlust},t}(p(t), Q(t), n, \alpha),$$

so dass sich die zu lösende Optimierungsaufgabe formulieren lässt:



$$\min \left\{ W_{Verlust} = \sum_{t=0}^T P_{Verlust,t}(p(t), Q(t), n, \alpha) \right\}$$

Dem dynamikoptimierten Modell kann ein Bewegungsmodell des Hydraulikzylinders zugrunde gelegt werden, das Geschwindigkeit, Beschleunigung und Last/Gegenkraft in äquivalente

- 5 Sollwerte für Druck und Volumenstrom transformiert. Im Folgenden sei exemplarisch ein vereinfachtes Modell angegeben:

$$p_{soll} = \frac{m \cdot a_{soll} + F_{Last}}{A_{Zylinder}} \quad Q_{soll} = A_{Zylinder} \cdot v_{soll} + \dot{p}_{soll} \frac{E_{Öl}}{V_{System}}$$

Dabei bezeichnet

m : bewegte Masse des Kolbens

- 10 F_{Last} : Gegenkraft

$A_{Zylinder}$: wirksame Kolbenfläche

$E_{Öl}$: Elastizitätsmodul der Hydraulikflüssigkeit

V_{System} : Gesamtvolumen der Hydraulikflüssigkeit

- 15 Für den dynamikoptimierten Modus werden insbesondere die unten genannten Nebenbedingungen berücksichtigt, sodass auf zusätzliche Vorsteuerungen wie in DE 10 2011 119 299 A1 verzichtet werden kann. Für einen hydraulischen Prozess lässt sich die für den Verfahrensablauf zu lösende Optimierungsaufgabe ableiten zu:

$$\min \left\{ \Delta Zyklus = a \cdot \sum_{t=0}^T |p_{soll,t} - p_{ist,t}(n, \alpha)| + b \cdot \sum_{t=0}^T |Q_{soll,t} - Q_{ist,t}(n, \alpha)| \right\}$$

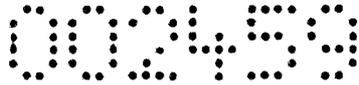
- 20 Hierin können mit den Koeffizienten a und b die Abweichungen im Druck und Volumenstrom unterschiedlich gewichtet werden.

Eine kombinierte Optimierungsaufgabe lässt sich darstellen als:

$$\min \{ A \cdot W_{Verlust} + B \cdot \Delta Zyklus \}$$

- 25 wobei mit den Koeffizienten A und B die Verluste und Abweichungen unterschiedlich gewichtet werden.

In die Optimierung können beispielsweise nachfolgende Nebenbedingungen eingehen:



$ n_t \leq n_{\max}$	Drehzahlgrenzwert
$ \dot{n}_t \leq \dot{n}_{\max}$	Beschleunigungsgrenzwert
$ M_{\text{Zyklus},t} \leq M_{\text{Motor},\max}$	Drehmomentgrenzwert: $M_{\text{Zyklus},t} = M_{\text{Zyklus},t}(p, Q, n, \dot{n}, \alpha)$ → berechnet über Verlust-/Bewegungsmodell
$-1 \leq \alpha_t \leq 1$	Relativer Schwenkwinkel
$ \alpha_t \leq \dot{\alpha}_{\max}$	Bewegungsgrenze der Schwenkscheibe

Dadurch, dass die Zielfunktion für einen Verfahrensablauf (hier Zyklus $0 \dots T$) und nicht nur für einen Arbeitspunkt vorgegeben wird, können vorteilhafterweise auch dynamische Verluste, transiente Übergänge und zeitabhängige Nebenbedingungen berücksichtigt werden.

5

Bei arbeitspunktbasierenden Konzepten kann die Optimierungsaufgabe auf Grund der statischen Betrachtung immer bloß für einen konkreten Arbeitspunkt in einem einzelnen Zeitschritt durchgeführt werden. Diese Einschränkung führt einerseits dazu, dass eine scheinbar energieoptimale Regelung eines Prozesses entlang einer Kurve von statisch optimierten Arbeitspunkten für Drehzahl/Schwenkwinkel bei dynamischen Prozessen tatsächlich zu einem Anstieg der benötigten Energie auf Grund der vernachlässigten dynamischen Verluste führt. Andererseits geht bei schnellen Prozessen Dynamik verloren, da beispielsweise bei Volumenstromsprüngen mit anfänglich geringer Motordrehzahl und kleinem Schwenkwinkel sowohl Drehzahl als auch Schwenkwinkel vergrößert werden müssen.

15

Durch die Betrachtung eines Verfahrensablaufs werden die beiden oben genannten Probleme unmittelbar gelöst. Die Energieeffizienz wird durch die Berücksichtigung dynamischer Verluste sichergestellt und der Dynamikverlust wird durch die integrierten Nebenbedingungen aufgehoben. Entscheidend sind hier insbesondere Beschleunigung, Moment und Schwenkwinkel-Stellgeschwindigkeit.

20

Dynamische Verluste W_{el} des Elektromotors lassen sich beispielsweise ausdrücken mit:

$$W_{el} \approx \frac{1}{2} J_{ges} \cdot \omega^2 \Big|_{\omega_1}^{\omega_2} + \int \frac{3}{2} \cdot R_{Cu} \left(\frac{M_{ges}}{k_M} \right)^2 dt$$



Dabei bezeichnet

$$M_{ges}: \text{Drehmoment: } M_{ges} = (J_{Motor} + J_{Pumpe}) \cdot \dot{\omega} + M_{Prozess}$$

J : Trägheitsmoment

ω : Kreisfrequenz

5 $M_{Prozess}$: Lastmoment

R_{Cu} : elektrischer Widerstand des Motors

k_M : Motorkonstante

10 Der erste Term der dynamischen Verluste entspricht der kinetischen Energie. Bei Einsatz eines Frequenzumrichters mit Rückspeisefähigkeit ist dieser nicht als Verlust zu sehen.

Dynamische Verluste $W_{Dynamik}$ einer Axialkolbenpumpe in Schwenkscheibenbauweise lassen sich beispielsweise ausdrücken mit:

$$W_{Dynamik} = \int \frac{J_{Scheibe} \cdot \ddot{\alpha}(t) + M_1}{A \cdot x} \cdot Q(t) dt + \int \frac{M_{Reib}}{A \cdot x} \cdot Q(t) dt$$

15

Dabei bezeichnet

$J_{Scheibe}$: Trägheitsmoment der Schwenkscheibe

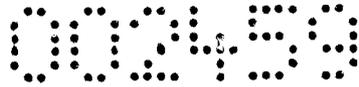
A : Kolbenfläche des Stellzylinders für die Schwenkscheibe

20 x : Abstand der Kolbenlängsachse des Stellzylinders für die Schwenkscheibe von der Drehachse

M_1 : vom Stellzylinder auf die Schwenkscheibe aufgebracht Moment

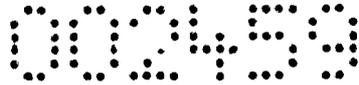
M_{Reib} : Reibmoment im Stellzylinder

25 Das Reibmoment für die Verstellung der Schwenkscheibe kann beispielsweise empirisch ermittelt werden.



PATENT
Ansprüche

- 5 1. Verfahren zur Regelung einer Druckmittelzufuhr für mindestens einen hydraulischen Aktor (110), der von einer drehzahlvariablen Verstellpumpe (120), bei der ein in einem Verdrängervolumen je Arbeitsspiel verstellbares Förderwerk (122) von einem drehzahlvariablen Antrieb (121) angetrieben wird, mit einer Druckmittelmenge versorgt wird, die durch ein vorgegebenes Druck- und/oder Volumenstrom-Profil bestimmt ist, wobei ein Drehzahl-
- 10 sollwert (n_{Soll}) und ein Sollwert (α_{Soll}) für die das Verdrängervolumen je Arbeitsspiel bestimmende Kenngröße für einen Verfahrensablauf vorgegeben werden, indem ein modellbasiertes Optimierungsproblem, das durch eine Zielfunktion für den Verfahrensablauf vorgegeben wird, gelöst wird.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Zielfunktion durch ein quadratisches Kriterium ausgedrückt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei wenigstens eine Nebenbedingung berücksichtigt wird.
- 20 4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die wenigstens eine Nebenbedingung durch ein quadratisches Kriterium ausgedrückt wird.
5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das Optimierungsproblem als quadratisches Programm mit wenigstens einer quadratischen Nebenbedingung gelöst wird.
- 25 6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Zielfunktion eine minimale Verlustleistung und/oder eine minimale Regelabweichung umfasst.
- 30 7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei in der Zielfunktion dynamische Verluste, die von einer Veränderung des Drehzahlsollwerts (n_{Soll}) oder des Sollwerts (α_{Soll}) für die das Verdrängervolumen je Arbeitsspiel bestimmende Kenngröße verursacht werden, berücksichtigt werden.



8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das Druck- und/oder Volumenstrom-Profil aus einem Sollzustand (\vec{r}_{Soll}) des hydraulischen Aktors (110) bestimmt wird.
- 5
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei der Sollzustand (\vec{r}_{Soll}) des hydraulischen Aktors (110) einen Lagesollwert, einen Geschwindigkeitssollwert, einen Beschleunigungssollwert und/oder einen Kraftsollwert umfasst.
- 10
10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das modellbasierte Optimierungsproblem im Rahmen einer modellprädiktiven Regelung gelöst wird, der als Eingangsgröße ein Istzustand (\vec{r}_{Ist}) des hydraulischen Aktors (110) zugeführt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei der modellprädiktiven Regelung ein Lageistwert, ein Geschwindigkeitsistwert, ein Beschleunigungsistwert und/oder ein Gegenkraftistwert als Istzustand des hydraulischen Aktors (110) zugeführt werden.
- 15
12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei als hydraulischer Aktor (110) ein Hydraulikzylinder mit einem beweglichen Kolben (111) verwendet wird.
- 20
13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei der Drehzahlsollwert (n_{Soll}) unter Verwendung eines Geschwindigkeitssollwerts (v_{Soll}) und eines Geschwindigkeitsistwerts (v_{Ist}) des Kolbens (111) des Hydraulikzylinders verändert wird.
- 25
14. Recheneinheit (140), die dazu eingerichtet ist, ein Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche durchzuführen.
15. Computerprogramm mit Programmcodemitteln, die eine Recheneinheit veranlassen, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13 durchzuführen, wenn sie auf der Recheneinheit, insbesondere nach Anspruch 14, ausgeführt werden.
- 30
16. Maschinenlesbares Speichermedium mit einem darauf gespeicherten Computerprogramm nach Anspruch 15.

07. April 2014

Seite 13 von 14

13 / 15

PATENTANWÄLTE
PUCHBERGER, BERGER & PARTNER
A-1010 Wien, Freyunggasse 13
Telefon 512 23 00, Telefax 513 37 09

Fig. 1

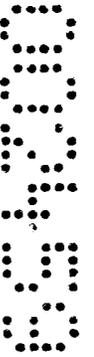
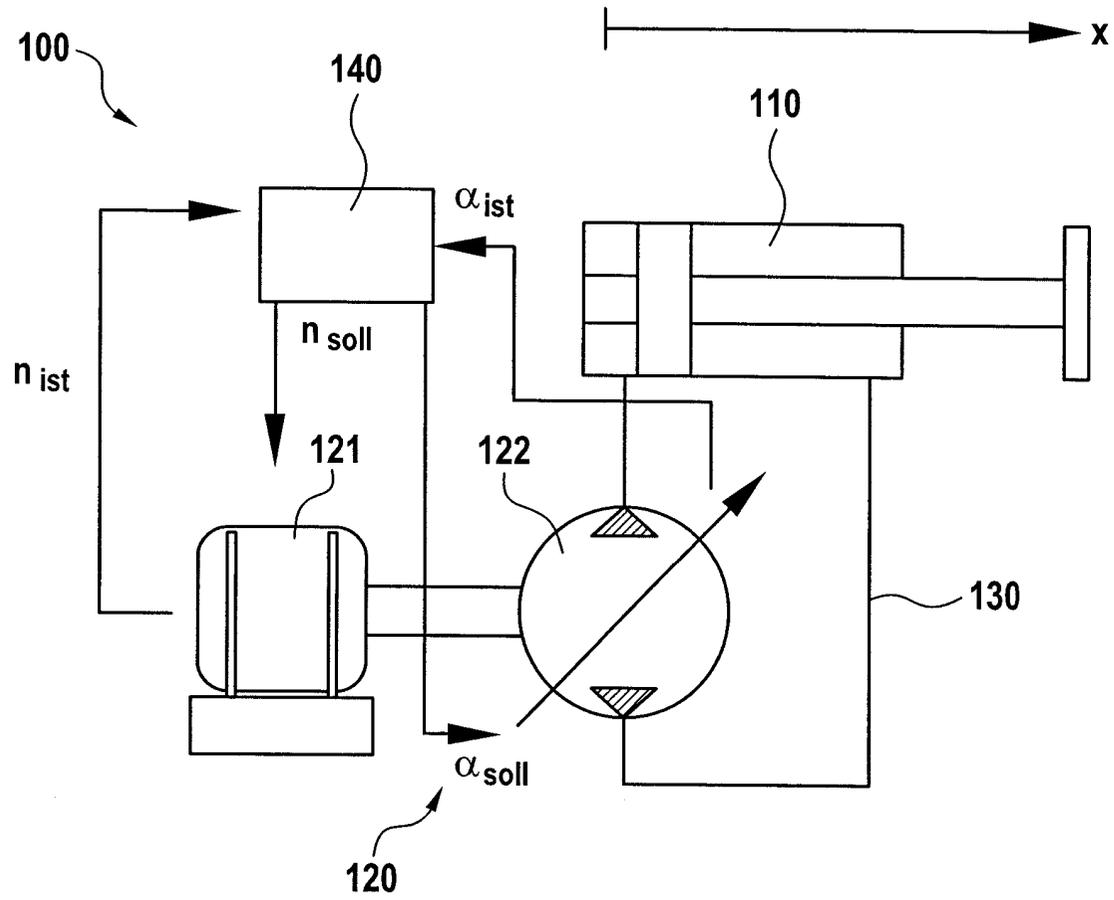


Fig. 2

