

8 Zusammenfassung

Die Arbeit befaßt sich mit der Regelung von Verstelleinheiten am Netz mit angepaßtem Versorgungsdruck. Im Gegensatz zu ventilgesteuerten Motoren erfolgt bei der Verdrängersteuerung eine bedarfsgerechte Leistungsentnahme aus dem Drucknetz durch die Regelung des Schluckvolumens. Damit entfallen die an den Ventilen auftretenden Drosselverluste. Die Verstelleinheiten können sowohl im Drehzahl- oder Lageregelkreis als auch im Drehmoment- oder Stellwegregelkreis betrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Konzepte für eine digitale, elektrohydraulische Regelung und Steuerung von mehreren, mechanisch gekoppelten Verstelleinheiten im Drehzahl- und Drehmomentregelkreis, deren Versorgung aus einem Drucknetz erfolgt, erarbeitet. Die Auslegung der Regler erfolgt anhand eines linearen Modells mit Hilfe des Wurzelortskurvenverfahrens. Durch die Erweiterung der Reglerstruktur kann der Störgrößeneinfluß der angekoppelten Einheiten durch regelungstechnische Maßnahmen weitgehend kompensiert werden.

Das Ergebnis der Reglerauslegung auf Basis des linearen Modells wird durch eine nichtlineare Simulation mit dem Programmsystem *DSHplus*, in dem alle wesentlichen Begrenzungen und Nichtlinearitäten des Hydrauliksystems berücksichtigt werden, überprüft. Die hiermit gewonnenen Ergebnisse, die mit den an der Anlage durchgeführten Messungen übereinstimmen, zeigen ein sehr gutes Regelverhalten der Anlage beim Einsatz eines P- bzw. PI-Drehmomentreglers und eines PDT_1 -Drehzahlreglers. Zudem liefert die Bewertung der Reglergebnisse mit Hilfe eines integralen Gütekriteriums Hinweise zur Einstellbarkeit der Reglerparameter.

Aufgrund der Vielzahl der Reglerparameter wird deren Einstellung durch eine Optimierungsstrategie übernommen. Es kommen dabei zwei Verfahren zum Einsatz: Die Strategie von Hooke und Jeeves als Vertreter der Suchstrategien und die Evolutionsstrategie als ein Zufallsverfahren. Die Effizienz der beiden Methoden wird am Prüfstand überprüft und vergleichend gegenübergestellt. Beide Optimierungsstrategien finden dabei das selbe Optimum. Aufgrund der Vielzahl der zu optimierenden Parameter führt die Evolutionsstrategie hierbei schneller zum Erfolg, während sich die Strategie von Hooke und Jeeves für wenige Parameter besser eignet. Das Gütemaß des Reglergebnisses kann im Vergleich zu dem Ergebnis, das

mit einem von Hand eingestellten Reglerparametersatz erzielt wird, um annähernd 30% verbessert werden.

Die statische Untersuchung der Drehmomentregelung zeigt, daß sich aufgrund der im System wirkenden Verstellkräfte und der Störeinflüsse des Ventils bei Verwendung eines P-Reglers Regelabweichungen ergeben. Mit Hilfe eines PI-Reglers gelingt es aber, diese Abweichung fast vollständig auszugleichen. Die bleibenden Abweichungen sind im Vergleich zu den überlagerten, für Kolbenmaschinen typischen Drehmomentpulsationen verschwindend gering.

Die Messungen des dynamischen Verhaltens ergeben aufgrund der hydraulischen und mechanischen Kopplung eine starke, gegenseitige Beeinflussung der Motoren. Mit Hilfe einer Entkopplungsstrategie, die teilweise auf ein nichtlineares Konzept aufbaut, werden die Abweichungen auf ein Minimum reduziert. Insbesondere der Drehzahlregelkreis wird fast vollständig autonomisiert. Beim Störgrößenverhalten des Drehmoment- und Druckregelkreis wird eine Verbesserung erzielt. Die gegenseitige Beeinflussung der gekoppelten Größen wird aber nicht vollständig eliminiert.

Die Verluste von Verstelleinheiten am Drucknetz sind im wesentlichen durch den Versorgungsdruck, das Schluckvolumen und die Drehzahl bestimmt. Insbesondere zu geringem Schluckvolumen und hohem Versorgungsdruck hin steigen die volumetrischen Verluste und die Reibverluste der Einheiten an. Durch die genaue Analyse des Einflusses der einzelnen Verluststellen auf den Gesamtverlust wird ein Modell zur Berechnung der betriebspunkt-abhängigen Verluste aufgestellt. Der Vergleich mit an den Einheiten durchgeführten Messungen ergibt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Zur Minimierung der Verluste wird der Versorgungsdruck an den jeweiligen Betriebspunkt angepaßt. Die Adaption des Drucks erfolgt dabei ausgehend von dem Wirkungsgradkennfeld der untersuchten Verstelleinheiten. Aus diesem wird der optimale Versorgungsdruck ermittelt, bei dem die Verstelleinheiten jeweils mit den geringsten Verlusten arbeiten. Insbesondere im Teillastbereich werden erhebliche Wirkungsgradverbesserungen, teilweise eine Verdopplung des Wirkungsgrads erzielt. Positiver Nebeneffekt der Anpassung des Versorgungsdrucks ist die Möglichkeit, das Beschleunigungsvermögen der Einheiten zu verbessern.

Die Digitalisierung der Regler erlaubt eine flexible Anpassung an das Streckenverhalten. Die Veränderung des Versorgungsdrucks bedingt eine Modifizierung der Reglerstrukturen. In Anlehnung an den Algorithmus von Ackermann werden die, mit Hilfe des vereinfachten, linearisierten Modells der Regelstrecken ermittelten, dynamischen Kennwerte Eigenkreisfrequenz und Dämpfung der Verstellmotoren durch eine gesteuerte Adaption der Reglerkennwerte an den Druck konstant gehalten. Hierdurch ist es möglich, den Druck in weiten Bereichen zu variieren, ohne Einbußen in der Systemstabilität in Kauf nehmen zu müssen.

Weiterhin ermöglicht die Kenntnis der betriebspunktabhängigen Verluste, auf den Einsatz einer Drehmomentmeßwelle zu verzichten und eine Drehmomentsteuerung aufzubauen. Das Drehmoment, welches proportional zu dem Produkt aus Schluckvolumen und Wirkungsgrad ist, wird mit der Regelung des Schluckvolumens und der Berechnung des betriebspunktabhängigen Verlusts mit guter Genauigkeit gesteuert.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, daß durch den Einsatz digitaler Reglerstrukturen ein weites Anwendungsfeld für neue Steuerungs- und Regelungskonzepte zur Verbesserung des Regel- und Verlustverhaltens von Verstelleinheiten erschlossen werden kann. Allein durch steuerungs-technische Maßnahmen verdoppelt sich für bestimmte Betriebspunkte der Wirkungsgrad annähernd. Weiterhin kann durch den Einsatz digitaler Strukturen auf eine Drehmomentmeßwelle verzichtet werden. Der Trend zur Digitalisierung von regelungstechnischen Aufgaben in industriellen Anwendungen bewirkt eine erhebliche Kostenreduzierung und die damit verbundenen Weiterentwicklungen eine erhöhte Betriebssicherheit der benötigten Komponenten, so daß zukünftig die Anwendung der genannten Reglerstrukturen auch für kostengünstige Standardanwendungen möglich wird.