

Aktive und adaptive Reduzierung pumpeninduzierter Druckpulsationen in geschlossenen hydraulischen Kreisläufen mit Kreiselpumpen

Entwicklung eines elektrohydraulischen Aktuators zur Reduzierung kreiselpumpeninduzierter Druckpulsationen und Erforschung seiner Wirksamkeit im Betriebskennfeld eines geschlossenen hydraulischen Kreislaufs.

Von: Johannes Büker

Der Anteil an bedarfsgerecht geregelten Pumpen wird in Zukunft durch den Bedarf einer effizienter Ressourcennutzung stark ansteigen. Weiter besteht die Idee, die im Feld befindlichen Pumpen zur Stabilisierung des elektrischen Verbundnetzes zu nutzen. In allen Fällen muss dabei die Drehzahl variiert werden. Eine Drehzahlvariation führt zu einer Änderung des Betriebspunkts. Diese Änderung geschieht mit unterschiedlicher Dynamik. Druckpulsationen, ausgelöst durch instationäre Vorgänge innerhalb der Pumpen, breiten sich im gesamten Rohrleitungssystem und allen Einbauten aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist eine Funktion der Steifigkeit des Rohres und der Einbauten sowie der Kompressibilität des Fluids. Für Wasser kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Druckpulsationen zwischen einigen 100 m/s bei Schläuchen bis zu ca. 1500 m/s bei sehr steifen Rohren betragen. Druckpulsationen führen, je nach Amplitude und Frequenz, zu Schwingungen der Struktur und Schallemissionen. Im schlimmsten Fall kann es zu destruktiven Schäden an der Pumpe und am Rohrleitungssystem kommen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein aktives und adaptives System zur Dämpfung dieser Druckpulsationen zu erforschen und dessen Wirksamkeit in einem geschlossenen Pumpensystem mit einer Kreiselpumpe nachzuweisen. Dafür wird ein System entwickelt, welches auf dem Prinzip der aktiven Geräuschunterdrückung (engl. Active Noise Cancellation, kurz ANC) beruht.

Es wird ein Aktuator entwickelt, der in der Lage ist, Wechseldruckamplituden in das Rohrleitungssystem abzustrahlen. Die Amplitude des Wechseldruckes ist mindestens so groß, wie die von der Kreiselpumpe ausgehende Druckpulsationsamplitude. Der Aktuator wird nach dem Kolbenstrahler-Prinzip ausgeführt. Der Kolben ist mit einer Dichtlippe zur Zylinderwand abgedichtet. Die Kolbenstange ist linear geführt und wird durch einen gestapelten, piezoelektrischen Aktuator (Piezoaktuator) angetrieben. Die Rückseite des Kolbens mit der Kolbenstange und dem Piezoaktuator ist mit Luft unter atmosphärischem Druck beaufschlagt. Die Kolben-Vorderseite ist mit Wasser und dem Systemdruck des geschlossenen hydraulischen Kreislaufs belastet. Das System aus Kolben, Zylinder und Piezoaktuator, zusammenfassend als Aktuator bezeichnet, ist über eine Rohrverzweigung in der Druckleitung hinter der Pumpe integriert. Die Rohrverzweigung, in welche der Aktuator montiert ist, ist in einen Winkel von 30 Grad zur Druckleitung ausgeführt. Dies ist ein Kompromiss aus möglichem Bauraum für den Aktuator und möglichst paralleler Abstrahlung der interferierenden Druckpulsation des Aktuators in Strömungsrichtung.

Der adressierte Frequenzbereich liegt zwischen 80 Hz und 1000 Hz. Die dominanten Anteile der Druckpulsation umfassen die erste bis dritte Ordnung der Blattpassierfrequenz. Diese Anteile werden mit drei parallelen adaptiven FIR-Filtern reduziert. Drei parallele adaptive FIR-Filter werden benötigt, da zwischen den drei Ordnungen der Blattpassierfrequenz teilweise große Phasenunterschiede vorhanden sind. Bei den Filtern handelt es sich um Schmalband-Filter deren Referenzsignale aus einem inkrementell abgetasteten Signal der Pumpendrehzahl erzeugt werden. Die adaptiven FIR-Filter arbeiten nach dem Feedforward-Prinzip. Die Filterkoeffizienten werden mit einem FxLMS (engl. filtered-x-

Least-Mean-Square-Algorithmus) angepasst. Das Übertragungsverhalten zwischen Aktuator und Rohrverzweigung wird bei der Berechnung berücksichtigt und mittels eines generischen Rauschsignals identifiziert. Die ermittelte Übertragungsfunktion wird genutzt, um das Eingangssignal vor zu filtern. Die erforschte Regelung für das ANC-Systems wird mittels LabVIEW auf einem echtzeitfähigen FPGA (Field Programmable Gate Array)-Entwicklerboard umgesetzt.

Die Wirksamkeit des ANC-Systems wird im gesamten Betriebskennfeld des Pumpensystems untersucht. Dabei werden die dominanten Anteile der Druckpulsationen, die durch die erste bis dritte Ordnung der Blattpassierfrequenz verursacht werden, adressiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem entwickelten ANC-System die Druckpulsationen im untersuchten Pumpensystem deutlich reduziert werden. Die Amplituden der Druckpulsationen der ersten drei Ordnungen der Blattpassierfrequenz werden um bis zu 99,5%, gegenüber dem ungedämpften Betrieb des Pumpensystems, reduziert.

Eine Erforschung der breitbandigen Reduzierung des gesamten Frequenzspektrums kann das Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Das entwickelte ANC-System bewirkt zusätzliche eine deutliche Reduktion der Schwingung des Pumpensystems. Es werden Reduktionen von bis zu 80 Prozent der Beschleunigungen, im Vergleich zum Betrieb ohne ANC-System, erreicht. Dies gilt insbesondere für resonanzbedingte Überhöhungen. Es kann gezeigt werden, dass Amplitudenüberhöhungen der Druckpulsationen und der Strukturschwingungen, infolge von Resonanzeffekten, durch das entwickelte Dämpfungssystem vermieden werden können. In der Folge kann eine freie Regelung der Pumpe, ohne Rücksicht auf anlagenbedingter Resonanzstellen, gewährleistet werden.

Durch die Senkung von Strukturschwingungen wird auch die Emission von Luftschall verringert. Im Umfeld der untersuchten Pumpe kann eine Reduktion der Schallemission von bis zu 14,1 dB durch den Einsatz des Dämpfungssystems erzielt werden.

Im Betriebspunkt des besten Wirkungsgrades der Pumpe beträgt die Summe der elektrischen Leistungsaufnahme, des Aktuators und des Verstärkers 28,3 W. Der elektrische Antrieb der Pumpe benötigt an diesem Betriebspunkt 10592,6 W. Im Verhältnis zu der durch den Pumpenantrieb aufgenommen elektrischen Leistung ergibt sich ein Wert von 0,27 %. Die maximale untersuchte elektrische Leistungsaufnahme des Pumpenantriebs beträgt 14012,8 W. An diesem Betriebspunkt verbraucht der Aktuator mit Leistungsverstärker 33,4 W, das entspricht 0,231 % der Leistung des Pumpenantriebs. Der geringe Mehraufwand ist auch in industriellen Anwendungen vertretbar, wenn dieses mit einer Reduktion von Druckpulsationen, Schwingungen und Schallemissionen einhergeht.

Mit Blick auf eine Stabilisierung des elektrischen Verbundnetzes durch Pumpenantriebe lässt sich schlussfolgern, dass das entwickelte ANC-System zu Reduzierung der Druckpulsationen, infolge von Drehzahlanpassungen prinzipiell geeignet ist. Für schnelle Änderungen bei Netzpendelungen von 1,5 Hz muss das vorliegende ANC-System weiter erforscht und entwickelt werden.