

Erkennung der charakteristischen hydroakustischen Eigenschaften eines Pumpensystems durch breitbandige aktive Druckwellenreduktion

Von: Paul Werner

Der allgegenwärtige und notwendige Einsatz von Kreiselpumpen in Industrie und Infrastruktur führt zur Emission unerwünschter Druckpulsationen in die verbundenen Rohrleitungssysteme. Leitungen, Fundamente und Verbraucher werden zu struktureller Schwingung angeregt und emittieren Luftschallabstrahlung an die Umgebung. Als effiziente und klimabewusste Regelstrategie hat sich die Drehzahlregelung für Kreiselpumpen etabliert, die jedoch die Kontrolle und Reduktion von emittierten Druckpulsationen erschwert. Für die Regelung werden außerdem Informationen bezüglich des Betriebspunktes der Pumpe benötigt, die durch zusätzliche Sensoren aufgenommen werden müssen.

In einer vorangegangenen Forschungsarbeit von Johannes Büker 2022 wurde ein adaptives Dämpfungssystem basierend auf dem Prinzip der destruktiven Interferenz entwickelt. Dieses ANC-System ermöglicht die Reduktion charakteristischer, schmalbandiger Druckpulsationen an den Frequenzen der ersten drei BPF's abhängig von der Pumpendrehzahl. Strukturelle Schwingungen und die Luftschallabstrahlung werden infolgedessen reduziert. Für jede Frequenz, an der die Druckpulsationen reduziert werden sollen, ist in diesem ANC-System ein eigenes adaptives Filter nötig. Die Anzahl der reduzierbaren Frequenzanteile ist damit abhängig von den verfügbaren Berechnungsressourcen. Die adressierbaren Frequenzen sind zudem auf Vielfache der Drehfrequenz begrenzt.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird das ANC-System um die Fähigkeit erweitert, Druckpulsationen an beliebigen Frequenzen und ganzen Frequenzbändern zu reduzieren. Dafür wird ein breitbandig wirksames adaptives Filter implementiert. Die erreichbare Reduktion wird im Vergleich mit der schmalbandigen Druckwellenreduktion im gesamten Kennfeld einer Kreiselpumpe erforscht. Im ANC-Controller des bestehenden ANC-Systems wird ein zusätzliches adaptives Filter implementiert, dessen Filterparameter unabhängig von den schmalbandigen adaptiven Filtern sind. Der zugrundeliegende adaptive Filteralgorithmus wird auf den MNF_xMS-Algorithmus umgestellt, der verbesserte Stabilität bei höheren Schrittweiten ermöglicht. Für den breitbandigen Betrieb des ANC-Systems wird eine Feedback-Neutralisation im Algorithmus integriert. Mit der Implementierung eines Systems zur automatischen Signalverstärkung wird die Effektivität des ANC-Systems beim Sinken der Signalleistung infolge starker Druckwellenreduktion sichergestellt. Das ANC-System wird mit einem zweiten Drucksensor in der Druckleitung der Pumpe erweitert, der stromauf der Sekundärquelle positioniert wird. Das Signal dieses Sensors dient dem zusätzlichen adaptiven Filter als Referenzsignal und ermöglicht die breitbandige Wirksamkeit. Während der breitbandigen Druckwellenreduktion werden die konvergierten Filtergewichte des neu implementierten adaptiven Filters an jedem untersuchten Betriebspunkt der Pumpe gespeichert. Mithilfe der Fourier-Transformation wird die Frequenzantwort der Filtergewichte gebildet. Die Eigenfrequenzen des Pumpensystems werden in einem Frequenzband von 10...1000Hz experimentell bestimmt, um einen Vergleich zu den Frequenzantworten der Filtergewichte herstellen zu können. Dafür wird das Pumpensystem mit einem Kontrollsignal durch den Aktuator hydroakustisch angeregt und die Frequenzantwortfunktionen zwischen Kontrollsignal und gemessenen Drucksignalen gebildet. Zusätzlich werden die Eigenfrequenzen des Pumpensystems auf einem alternativem Weg bestimmt. Dazu werden die Frequenzspektren der im Pumpenbetrieb gemessenen Druckpulsationen aller untersuchten Betriebspunkte zu einem Ensemble-Mittel vereint. Durch den Vergleich der jeweils gefundenen Eigenfrequenzen des Pumpensystems ist eine Trennung vom Übertragungsverhalten des Aktuators möglich. Die Eigenfrequenzen des Pumpensystems werden an insgesamt vier Positionen im Pumpensystem ermittelt.

Die Reduktion der Druckpulsationen wird an diskreten Betriebspunkten im gesamten Pumpenkennfeld erforscht und an den Pegeln der ersten drei BPF's sowie den RMS-Pegeln quantifiziert. Die aktive Druckwellenreduktion wird jeweils mit drei Kombinationen der adaptiven Filter durchgeführt und untereinander verglichen:

Mit dem Einsatz des breitbandigen adaptiven Filters wird im Bestpunkt der Pumpe an der ersten BPF eine Reduktion von 44.4 dB/Hz erreicht. Die Reduktion ist im Vergleich mit dem schmalbandigen Filter

um etwa 3 dB/Hz größer. Ab Drehzahlen größer als 1300 rpm ist die Reduktion des breitbandigen Filters an der ersten BPF im Mittel mit 35.6 dB/Hz um 6 dB/Hz} größer als mit dem schmalbandigen Filter (29.4 dB/Hz). An der zweiten und dritten BPF wird mit dem breitbandigen Filter ebenfalls eine Reduktion erreicht (im Mittel jeweils 16.4 dB/Hz und 9.4 dB/Hz). Diese ist an den meisten Betriebspunkten im Kennfeld aber geringer als mit den schmalbandigen Filtern (im Mittel 20.9 dB/Hz und 16.6 dB/Hz). An einzelnen Pumpenkennlinien ist keine Reduktion möglich. Die Reduktion der RMS-Pegel ist mit dem einzelnen breitbandigen Filter im Teillast-Betrieb um bis zu 5.5 dB besser als mit den drei schmalbandigen Filtern. Im Nenn- und Überlast-Betrieb wird eine ähnliche Reduktion wie beim Einsatz der drei schmalbandigen Filter erreicht. Breitbandige Druckpulsationen, die an Eigenfrequenzen des Pumpensystems erhöhte Amplituden aufweisen, werden durch das breitbandige Filter um bis zu 12 dB/Hz reduziert.

Der kombinierte Betrieb der schmalbandigen und des breitbandigen adaptiven Filters erreicht im Vergleich mit den Einzelbetrieben die höchsten Reduktionen der BPF's (24.3 dB/Hz, 21.9 dB/Hz und 18.3 dB/Hz) und des RMS-Pegels (5.1 dB) im Mittel über das gesamte Kennfeld. Die erste BPF wird um maximal 52.8 dB/Hz reduziert. Der breitbandige Filter erreichte im Einzelbetrieb maximal 50 dB/Hz. Der schmalbandige Filter erreichte im Einzelbetrieb 47 dB/Hz. Die mittlere Reduktion der RMS-Pegel des gesamten Kennfelds wird im Vergleich zur schmalbandigen Reduktion um 0.9 dB verbessert. Insgesamt ermöglicht das breitbandig wirksame ANC-System die Reduktion der wesentlichen Druckpulsationen in einem realen Pumpensystem und benötigt dafür einen Bruchteil der Berechnungsressourcen eines vergleichbaren schmalbandigen ANC-Systems. Dabei werden zusätzlich breitbandige Druckpulsationen reduziert und die Anregung von Eigenfrequenzen des Pumpensystems verhindert.

Die Auswertung der Filtergewichte aus dem breitbandigen ANC-Betrieb zeigt, dass deren Frequenzantworten Peaks an den Eigenfrequenzen des Pumpensystems vorweisen. Diese Informationen sind selbst dann in den Filtergewichten vorhanden, wenn keine Reduktion der entsprechenden Druckpulsationen erreicht wird. Eine Mittlung der Frequenzantworten über mehrere Betriebspunkte der Pumpe erlaubt eine eindeutige Zuordnung. Damit ist die Erkennung und Vermeidung von schadhafte Resonanzen in einem Pumpensystem (auch außerhalb des Wirkungsbereichs des ANC-Systems) ohne zusätzliche Messungen möglich. Durch die kontinuierliche Adaption des ANC-Systems stehen diese Informationen ebenfalls kontinuierlich und in Echtzeit zur Verfügung.

Die BPF's der Pumpe sind in den Frequenzantworten der Filtergewichte im breitbandigen ANC-Betrieb deutlich zu erkennen. Mit Kenntnis der Schaufelzahl erlauben sie die Bestimmung der Drehzahl. Das ANC-System verändert die Frequenzantworten der Filtergewichte im Pumpenbetrieb außerdem abhängig von der Anlagenkennlinie. Es enthält Informationen, die die Unterscheidung der Anlagenkennlinien ermöglichen. Eine direkte Bestimmung der Anlagenkennlinien ist mit simplen Auswertemethoden jedoch nicht möglich. Hier sind zusätzliche Forschungsarbeiten und die Anwendung komplexer Methoden zur Klassifikation der Filtergewichte notwendig. Die Erkennung der Betriebspunkte ist beispielsweise mithilfe neuronaler Netzwerke und Machine Learning möglich. Die Informationen über Eigenfrequenzen des Pumpensystems und den genauen Betriebspunkt der Pumpe können in einem nächsten Schritt zur Regelung der Pumpe verwendet werden, ohne dass zusätzliche Sensoren für Drehzahl und Volumenstrom nötig sind. Durch einen intelligenten Datenaustausch zwischen ANC-System und Pumpenantrieb wäre gleichzeitig ein effizienterer, leiserer und sicherer Betrieb des Pumpensystems möglich.