

## Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb und Downsizing-Schleifen

DFG – HO 1483/57-1, 2009 – 2012

DFG – HO 1483/57-3, 2015 - 2017

### Zusammenfassung:

In der ersten Projektphase wurden Möglichkeiten für die energieeffiziente Steuerung elektrischer Stellantriebssystemen untersucht. Schwerpunkte hierbei waren die energieoptimale Bewegungssteuerung und die optimale Steuerung des Maschinenflusses.

Bei den theoretischen Untersuchungen zeigte sich, dass allein durch eine energieoptimale Bewegungssteuerung im Vergleich zu typischen Stellvorgängen eine deutliche Reduktion der Energieverluste und somit des Energiebedarfs möglich ist. Die Untersuchungen wurden für starre und schwingfähige (Zweimassenschwinger) Stellantriebssysteme durchgeführt. Bei schwingfähigen Stellantriebssystemen (z.B.: Laufkatze eines Brückenkrans mit pendelnd angehängter Last) ist der Energieeinspareffekt durch die energieoptimale Bewegungssteuerung stark von den Systemparametern des Stellantriebssystems abhängig. Für Stellaufgaben ohne Beschränkungen von Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit wurde der Energiespareffekt bei energie- und zeitoptimaler Bewegungssteuerung in Abhängigkeit des Verhältnisses von Positionierdauer zur System-Schwingungsperiodendauer darstellt. Der Energiespareffekt konnte somit für unterschiedliche schwingfähige Antriebssysteme ermittelt werden. Bei bestimmten Verhältnissen von Positionierdauer zu Schwingungsperiodendauer ist der Energieeinspareffekt im schwingfähigen Antriebssystem sogar größer als im starren Antriebssystem.

Eine weitergehende Energieeinsparung ist durch Downsizing des Antriebsmotors möglich. Auf Grund des geringeren Effektivmoments kann bei energieoptimaler Bewegungssteuerung ein kleinerer Motor mit demzufolge geringerem Massenträgheitsmoment eingesetzt werden als bei zeitoptimaler Bewegung. Die Einspareffekte durch das Downsizing des Antriebsmotors sind abhängig von den speziellen Änderungen der Motorbaugröße (Länge, Durchmesser, oder beides). Die Untersuchungen wurden für rotatorische Stellantriebe sowie für Linearmotoren in Einzelkammanordnung und Linearmotoren zylindrischer Bauform (Solenoidmotor) durchgeführt.

Um bei Stellantrieben mit Asynchronmaschinen das geforderte Drehmoment möglichst unverzögert einstellen zu können, wird der Motorfluss im Grunddrehzahlbereich typischerweise konstant auf seinen Bemessungswert geregelt. Grund hierfür ist die begrenzte Dynamik bei der Änderung des an der Drehmomentbildung beteiligten Motorflusses. In der bisherigen Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch eine optimierte Flusstrajektorie die während eines Stellvorgangs im Asynchronmotor auftreten-den Gesamtenergieverluste deutlich reduziert werden können. Der Motorfluss wird bereits während der Beschleunigung auf Teillastbetrieb (Konstantfahrt) reduziert. Damit zu Beginn des Bremsvorgangs der Motorfluss in optimalem Maße zur Verfügung steht, wird deutlich vor Beginn des Bremsvorgangs mit dem Flussaufbau begonnen. Die Optimierung der Flusstrajektorie erfolgte bisher vorab (offline). Hierzu ist es nötig, den Bewegungsverlauf, die Systemparameter, die Verlustleistungsmechanismen und die Lastverhältnisse möglichst genau zu kennen. Da die Systemparameter und die Lastverhältnisse sich oftmals während des Betriebs ändern ist der Anwendungsbereich dieses bisherigen Verfahrens (offline-Optimierung) eingeschränkt.

Die theoretischen Ergebnisse konnten durch Messungen an einem permanentmagneterregten Kurzstator-Synchron-Linearmotor sowie an rotatorischen Stellantrieben (permanentmagneterregte Syn-

chronmaschine und Asynchronmaschine) bestätigt werden. Die energieoptimale Bewegungssteuerung wurde dabei mit der zeitoptimalen Bewegungssteuerung und mit aus der Kurvenscheibentechnik bekannten Bewegungsgesetzen nach VDI-Richtlinie 2143 verglichen.

In der zweiten Projektphase wurden Möglichkeiten für die energieoptimale Steuerung elektrischer Stellantriebe unter Einbeziehung der gesamten Systemverluste. Schwerpunkt bilden dabei die energieoptimale Bewegungssteuerung und die optimale Steuerung des Maschinenflusses. Es zeigt sich dabei, dass die optimale Bewegungstrajektorie nicht mehr unbedingt auf der Geradenform der energieoptimalen Beschleunigungstrajektorie liegen muss. Bei Berücksichtigung der Umrichter- verluste ergibt sich eine nichtlineare Form mit größerer Maximalbeschleunigung, aber dafür reduzierter Maximalgeschwindigkeit. Bei hochdynamischen Beschleunigungsvorgängen mit ohnehin großen Drehzahlen tritt dieser Effekt bereits bei alleiniger Berücksichtigung von Eisen- und Reibungsverlusten des Stellmotors auf. Der prinzipielle Effekt einer größeren Maximalbeschleunigung zugunsten einer verringerten Maximalgeschwindigkeit ist für alle Maschinentypen gültig. Die so optimierte Beschleunigungstrajektorie weist gegenüber der energieoptimalen Trajektorie ein weiteres Energiesparpotential von zusätzlichen ca. 20 % auf. Allerdings muss für die größere Maximalbeschleunigung auch ein größerer Maximalstrom in Kauf genommen werden, der sich fallweise in erhöhten Anschaffungskosten für einen entsprechend stromtragfähigen Umrichter niederschlägt.

Unter dem Einfluss einer Begrenzung für den Maximalruck nähern sich die Optimierungsergebnisse wieder an die Geradenform der energieoptimalen Trajektorie an. Der Energiespareffekt fällt entsprechend geringer aus.

Bei der Optimierung des Rotorflusses zeigt sich, dass es bei Berücksichtigung weiterer Antriebsverluste sinnvoll sein kann, den Rotorfluss bereits abzusenken, auch wenn dem Stellmotor noch mindestens Bemessungsmoment abgefordert wird. Der damit erzielbare Energiespareffekt hängt stark von den Randbedingungen der Stellaufgabe ab und wird in der Regel größer, je länger der Motor zusammenhängend bei geringer Beschleunigung betrieben wird (maximale Drehzahl). Durch den Einfluss der Rotorzeitkonstante insbesondere bei Asynchronmaschinen ist eine Online-Nachführung des Flusses aber in der Regel nicht möglich. Die Optimierung muss vorab unter Kenntnis des gesamten Lastprofils erfolgen.

Ein Downsizing des Antriebsmotors ist vor allem für reine Beschleunigungsvorgänge mit geringem Lastträgheitsmoment interessant. Durch optimierte Bewegungsverläufe kann hier besonders das effektiv geforderte Drehmoment reduziert werden, sodass innerhalb der groben Staffelung der Bemessungsmomente der Motorenhersteller bereits ein kleinerer Motor gewählt werden kann (Tabelle 4). Steigt das Lastträgheitsmoment und kommt zusätzlich noch ein externes Lastmoment dazu, dann ist Downsizing nur noch bedingt möglich.

Mit den erstellten Algorithmen steht nun ein effektives Werkzeug zur Verfügung, um verschiedene Antriebskonfigurationen mit verschiedenen Antriebsmotortypen (Asynchronmotor, PM-Synchronmotor und Synchronreluktanzmotor) hinsichtlich der gewählten Stellaufgabe energetisch zu optimieren. Es können unterschiedliche Varianten durchgerechnet und miteinander verglichen werden. Es zeigte sich zudem, dass die Berücksichtigung der gesamten Antriebsverluste bei der Optimierung unabdingbar ist, da damit deutlich andere, aber stets bessere Ergebnisse erzielt werden können. Potentiale und Grenzen der Optimierung wurden aufgezeigt.