



Prof. Dr. Jens Onno Krah, Dr. Christoph Klarenbach

# Regeln mit mehrkanaliger Rückführung

Hochdynamische Servoantriebe tragen mit dazu bei, dass die Produktivität von Maschinen immer weiter steigt. Einerseits ist dabei eine möglichst hohe Regelkreisbandbreite gefragt, andererseits sollten – mit Blick auf das immer wichtiger werdende Thema Energie-Effizienz – die Verluste minimal gehalten werden. Wie lässt sich dies vereinbaren?

**A**ls Leistungshalbleiter kommen bei modernen Servosystemen meist IGBTs zum Einsatz. Unter anderem hängen die Verluste des IGBT-Wechselrichters – und damit auch die Abmessungen des Kühlkörpers/Gerätes – vom Ausgangsstrom und von der Schaltfrequenz ab. Bei IGBTs der normalerweise verwendeten 1200-V-Klasse und der üblichen Schaltfrequenz von 8 kHz sind die Schaltverluste ungefähr so hoch wie die Durchlassverluste. Es ist deshalb ersichtlich, dass eine höhere Schaltfrequenz – auf Kosten der Energie-Effizienz – eine schnellere Regelung ermöglicht.

Neben der Schaltfrequenz gibt es weitere Bandbreiten-begrenzende Faktoren bei der Strom-/Drehmomentregelung: die Strommessmethode, die ge-

nutzten Regelalgorithmen sowie die notwendige Rechenzeit zum Abarbeiten derselben. Bei der Strommessung und Regelung haben sich in der elektrischen Antriebstechnik insbesondere drei Methoden durchgesetzt.

## 1. Hysterese-Regelung

Bei der Hysterese-Regelung wird der aktuelle Strom kontinuierlich gemessen und mit dem Stromsollwert verglichen. Überschreitet die Regeldifferenz einen vorgegebenen Grenzwert, wird eine Schalthandlung der Leistungshalbleiter ausgelöst. *Bild 1* zeigt das beispielhaft an einem einphasigen System. Das Verfahren hat sich seit vielen Jahren bei Gleichstromantrieben (einphasig) in Kombination mit analoger Schaltungstechnik bewährt. Bei einer Erweiterung der Hys-

terese-Regelung auf Dreiphasendrehstrom entstehen Freiheitsgrade, zu deren Auflösung in der Regel prädiktive Regelalgorithmen verwendet werden.

Vorteil der Hysterese-Regelung ist die System-immanente Stabilität und – bei DC-Antrieben – die einfache Schaltungstechnik. Nachteilig sind die erforderliche hohe Rechenleistung zur prädiktiven Regelung von Drehstrommotoren und die nicht konstante Schaltfrequenz in Kombination mit zyklisch ausgeführten Steuerungsalgorithmen.

## 2. Digitale Regelung mit abgetasteten Strom-Istwerten

Wird der Strom synchron zur PWM mit doppelter PWM-Frequenz abgetastet, so wird der Stromripple effizient unterdrückt (*Bild 2*). Ein zusätzliches Anti-

(Bilder: Beckhoff)

Aliasing-Filter, welches die Regelkreisbandbreite deutlich reduzieren würde, ist nicht erforderlich. Charakteristisch für diese Methode ist eine geringe Totzeit bei vergleichsweise geringer Stör-signalunterdrückung. Deshalb wird der Strommessung oft ein Tiefpass erster Ordnung mit einer Zeitkonstanten von etwa 10  $\mu$ s vorgeschaltet. Ein prinzipieller Nachteil dieses Verfahrens ist ein möglicher alias-bedingter Offsetfehler des Stroms aufgrund einer phasenverschobenen Abtastung. Die digitale Abtastregelung nach dem Verfahren der Feldorientierung ist wahrscheinlich die am meisten genutzte Technik.

### 3. Digitale Regelung mit integrierten Strom-Istwerten

Durch eine Integration über exakt eine PWM-Periode lassen sich abtastbedingte Gleichanteile und Störungen effektiv unterdrücken (Bild 3). Zur Anwendung kommt diese Technik zum Beispiel auch bei handelsüblichen Multimetern, die den Messwert etwa über eine Zeitspanne von exakt 100 ms integrieren, um 50-Hz- und 60-Hz-Störungen zu unterdrücken. In der Praxis wird diese Integration durch die Bildung eines Mittelwertes vieler AD-Wandlungen mit hoher Abtastrate realisiert. Nachteile dieser genauen Technik sind der höhere Aufwand sowie eine zusätzliche regelungstechnisch wirksame Totzeit von einer halben PWM-Periode, die die Phasenreserve und damit die erreichbare Stromregelbandbreite reduziert.

### Aller guten Dinge sind drei

Vor diesem Hintergrund hat Beckhoff bei der Entwicklung des neuen Multiachs-Servosystems AX8000 die Stromregelung so konzipiert, dass die jeweiligen Vorteile der drei vorgestellten Stromregelverfahren genutzt werden können, ohne aber deren Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Durch die parallele Verarbeitung innerhalb des FPGAs beträgt die Ausführungszeit der Regelalgorithmen weniger als 1  $\mu$ s. Ein Prozessor würde durch seine sequenzielle Befehlsabarbeitung für die gleichen Rechnungen wesentlich mehr Zeit benötigen.

Die Strommessung des AX8000 nutzt für jede Phase Analog-Digital-Wandler nach dem Sigma-Delta-Verfahren. Di-

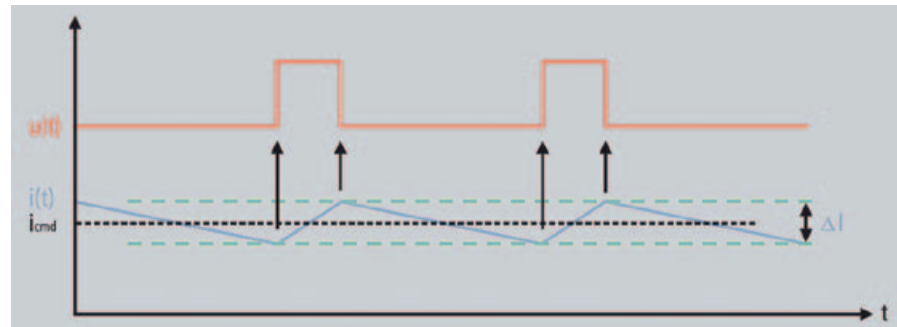


Bild 1. Bei einer Hysterese-Regelung schalten die Leistungstransistoren unmittelbar, nachdem der Strom einen Grenzwert überschreitet.

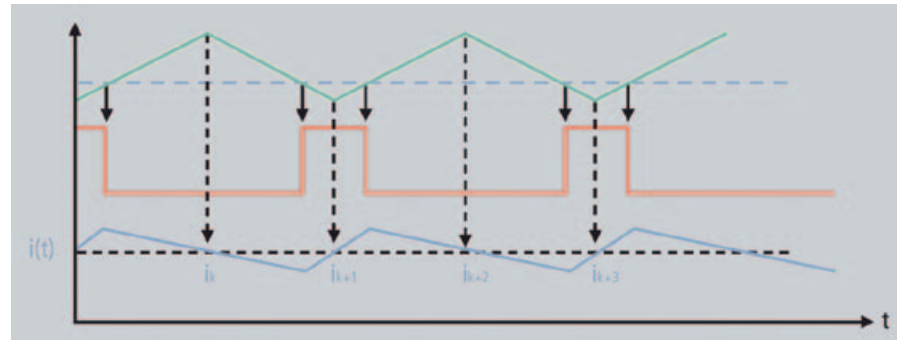


Bild 2. Abtastung des Stroms synchron zur PWM mit doppelter Schaltfrequenz.

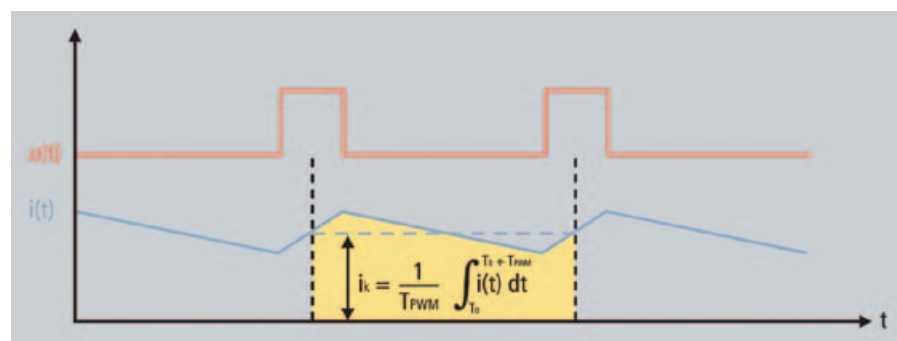


Bild 3. Strommessung durch Mittelwertbildung über genau eine PWM-Periode.

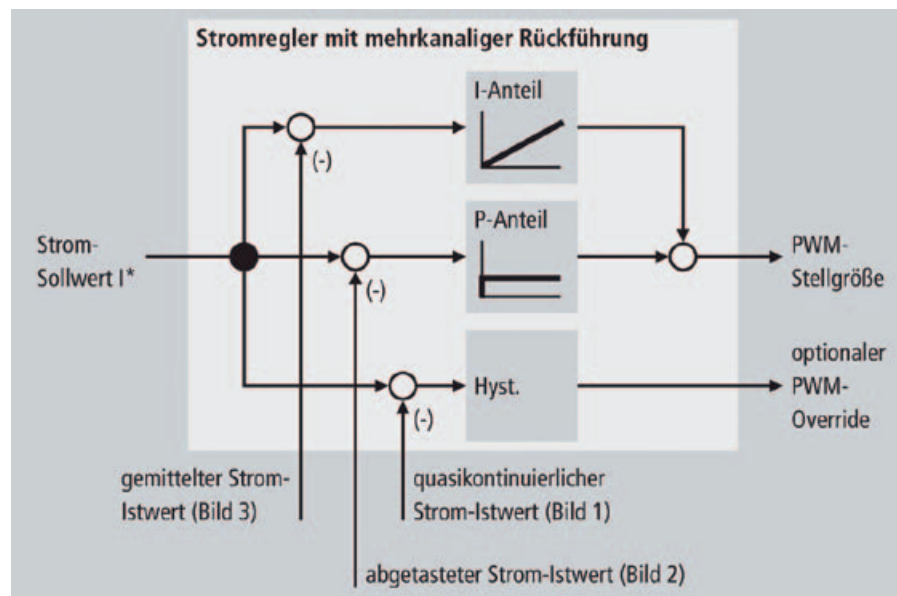


Bild 4. Das Multiachs-Servosystem AX8000 verwendet eine Stromregelung mit mehrkanaliger Rückführung.



**Bild 5.** An das zentrale Einspeisemodul des Multiachs-Servosystems AX8000 wird die benötigte Anzahl von ein- oder zweikanaligen Achsmodulen angereiht. Die Verbindung der Module erfolgt über das eingebaute Schnellverbindungssystem AX-Bridge auf Federzug-Klemmbasis. Die Einachs- und Doppelachsmodul lassen sich wahlweise mit Twinsafe für sichere Antriebstechnik ausstatten.



rekt an den drei Stromsensoren werden die analogen Signale in drei digitale Bitstreams umgesetzt. Jeder digitale und damit störungsempfindliche Bitstream ist mit einem Eingang des FPGA verbunden. EMV-Filterung, Abtastung und Integration erfolgen digital innerhalb des FPGA. Eventuelle EMV-Störungen können nach der Sigma-Delta-Umsetzung weder den Bitstream noch die digitale Signalverarbeitung beeinträchtigen.

Die meisten industriellen Stromregelarchitekturen basieren auf mehr oder weniger erweiterten PI-Reglern. Der Integralanteil bewirkt die Ausregelung von stationären Regeldifferenzen. Der unmittelbar wirkende Proportionalanteil des PI-Reglers ist für die Regelgeschwindigkeit und die Stabilität maßgebend. Eine Stromregelarchitektur mit mehrkanaliger Rückführung kann die charakteristischen Eigenschaften von P- und I-Anteil mit den Stärken der beschriebenen Strommessmethoden kombinieren. Der abgetastete und wenig verzögerte Strom ermöglicht in Kombination mit der sehr schnellen Ausführung der Regelalgorithmen eine hohe Stromregelbandbreite. Das genauere, über exakt eine PWM-Periode integrierte Stromsignal wird als Rückfüh-

rung für den I-Anteil des Reglers genutzt (Bild 4). Das Ergebnis ist eine sehr schnelle Stromregelung mit hoher Genauigkeit.

Bei der Regelung von Motoren, die bei hohen Spitzenströmen nennenswert sättigen, bieten Hysterese-Regelungen Vorteile. Insbesondere wenn der Strom während einer Abtastperiode beträchtlich steigt, verringert sich sättigungsbedingt die Induktivität sehr schnell, was wiederum die Stromanstiegsgeschwindigkeit noch weiter erhöht. Da der Strom bei Hysterese-Regelungen quasi kontinuierlich gemessen wird, kann unmittelbar auf solche Situationen reagiert werden.

Sobald beim AX8000 die Regeldifferenz des Stroms einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet, werden mit einer Verzögerung von etwa 1 µs die IGBTs so geschaltet, dass ein weiterer Stromanstieg verhindert wird. In der Regel erfolgt dies durch ein Vorziehen beziehungsweise Verzögern bereits geplanter IGBT-Schaltvorgänge. Die PWM bleibt synchron und die Schaltfrequenz verändert sich nicht. Nur in Ausnahmefällen werden Schalthandlungen vollständig unterdrückt, wodurch sich die Schaltfrequenz verringert.

Durch dieses nur sporadische Eingreifen zum ‚Abfangen‘ von Überströmen ist der PI-Regler durchaus aggressiv parametrierbar. Ein geringes Überschwingen von zum Beispiel 15 % beschleunigt die effektiv wirksame Reaktion auf Stellgrößen im Kleinsignalebereich. Bei einem Großsignalsprung würde ein Überschwingen – auch bei

starker Sättigung – zuverlässig abgefangen und nicht zu einem Endstufenfehler führen.

### Schaltfrequenz nahezu halbiert

Durch die Nutzung der beschriebenen Algorithmen kann ein Servoregler wie der AX8000 bereits mit einer Schaltfrequenz von nur 4 kHz Regelkreisbandbreiten erreichen, für die konventionelle Regler eine Schaltfrequenz von fast 8 kHz benötigen. Das erhöht die Energie-Effizienz des Servosystems. Ebenso lassen sich – bei reduzierter Zwischenkreisspannung – eisenlose Linearmotoren mit bis zu 32 kHz Schaltfrequenz betreiben. Die Stromregelung erfolgt bei dieser 32-kHz-Applikation durchweg mit doppelter Schaltfrequenz mit knapp 16 µs. Unabhängig von der Schaltfrequenz werden große Stromabweichungen nach rund 1 µs abgefangen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Der vollständig in Hardware implementierte Stromregler, wie er beim AX8000 umgesetzt wurde, vereint die Vorteile analoger und digitaler Regelungstechnik (Bild 5). Durch die Stromregelung mit mehrkanaliger Rückführung erreicht er bei 8 kHz Schaltfrequenz fast 4 kHz Bandbreite, was dem theoretisch maximal Machbaren entspricht. Durch die FPGA-basierte Regelung mit mehrkanaliger Rückführung kann entweder bei gleicher Schaltfrequenz die Dynamik einer Maschine gesteigert werden; alternativ lässt sich bei unveränderter Dynamik die Schaltfrequenz zur Verbesserung der Energieeffizienz nahezu halbieren. *gh*



**Prof. Dr. Jens Onno Krah**

ist tätig in der Entwicklung und im Produktmanagement Antriebstechnik bei Beckhoff.



**Dr. Christoph Klarenbach**

arbeitet im Bereich Entwicklung Antriebstechnik bei Beckhoff.