

# DTC

# Eine Motorregelungs- technik für alle Bedingungen

# DTC

## Eine Motorregelungstechnik für alle Bedingungen

*Drehzahlregelte Antriebe (VSD) ermöglichen bei Elektromotoren eine unübertroffene Leistung und bieten durch Anpassung der Motordrehzahl und des Drehmoments an die Anforderungen der Arbeitsmaschine erhebliche Energieeinsparungen. Die meisten drehzahlregelten Antriebe auf dem Markt setzen auf eine Modulatorstufe, die Spannungen und Frequenzen regelt, jedoch die Regelungssignale nur verzögert verarbeitet. Im Gegensatz hierzu verwenden die Premium-Frequenzumrichter von ABB die innovative direkte Drehmomentregelung (DTC), die das Drehmomentverhalten des Motors deutlich verbessert. Die DTC-Technik bietet noch weitere Vorteile bis hin zu Funktionen auf der Anlagenebene.*

Elektromotoren sind bei modernen Produktionsanlagen z. B. in der Metallverarbeitung, roboter-gesteuerten Fertigungszellen oder Gebäude- und Büroautomatisierungssystemen häufig die treibende Kraft. Die heutigen Motoren haben sicherlich vom Fortschritt bei den elektrischen Materialien, der Fertigungseffizienz und Analysewerkzeugen profitiert. Jedoch sind die Konstruktionsprinzipien bei den Drehstrom-Asynchronmotoren, den Arbeitspferden, seit mehr als 100 Jahren unverändert. Die bemerkenswerte Leistung dieser Motoren bei heutigen Anwendungen kommt von der modernen elektronischen Regelung – den Frequenzumrichtern – und exakten Motormodellen, deren komplexe Regelungsalgorithmen von digitalen Hochleistungssignalprozessoren schnell ausgeführt werden können. Außerdem hat die Entwicklung der Frequenzumrichter den Einsatz neuer Drehstrommotor-Technologien wie Permanentmagnet-Synchronmotoren und Synchronreluktanzmotoren ermöglicht.

Zunächst erweckten die Gleichstrommotoren die Aufmerksamkeit der Antriebsentwickler. Mit einer deutlich längeren Historie als ihre Verwandten, die Wechselstrommotoren, ermöglichten die Gleichstrommotoren eine einfache Drehzahl- und Drehmomentregelung. Jedoch erwiesen sich die höheren Motorkosten, eine komplexere Konstruk-

tion mit einem mechanischen Kommutator und die Probleme bei der Bürstenwartung als nachteilig für Gleichstrommotoren.

Asynchronmotoren sind robuster und einfacher in der Konstruktion, kostengünstiger und wartungsfreundlicher – Merkmale, die zu der weltweiten Verbreitung dieser Motoren geführt haben. Andererseits ist jedoch die Regelung von Asynchronmotoren schwieriger. Eine exakte Drehzahlregelung und besonders die Drehmomentregelung waren mit den ersten Frequenzumrichtern noch schwer realisierbar. Natürlich wollten die ersten Konstrukteure mit den Frequenzumrichtern die einfache Drehmomentregelung der Stromrichter durch Nutzung des Ankerstroms nachahmen. Im Laufe der Zeit wurden die Frequenzumrichter verbessert und wiesen eine höhere Dynamik auf. (Eine kürzlich geführte, beachtenswerte Diskussion über die verschiedenen vorhandenen Frequenzumrichter-Regelungsverfahren ist in Ref. 1 enthalten.)

In den 1980er-Jahren arbeiteten die meisten Hochleistungsfrequenzumrichter mit der Pulsweitenmodulation (PWM). Eine Folge der Verwendung einer Modulatorstufe ist jedoch die Verzögerung und die Notwendigkeit, die gemessenen Ströme bei der Ausführung der Motorregelungsbefehle zu filtern – wodurch sich die Drehmomentantwort verlangsamt.

Im Gegensatz hierzu verfolgte ABB einen anderen Ansatz bei der Hochleistungsmotorregelung. Bei Frequenzumrichtern für anspruchsvolle Anwendungen verwendet ABB eine innovative Technologie, die sich Direkte Drehmomentregelung (DTC) nennt. Bei diesem Verfahren wird das Drehmoment direkt geregelt, anstatt zu versuchen, die Ströme wie bei Stromrichtern zu regeln. Das erhöht die Genauigkeit bei der Erfüllung der Lastanforderungen des angetriebenen Systems. Durch DTC, die von einem der Gründungsunternehmen von ABB entwickelte und Mitte der 1980er Jahre patentierte Technik, entfällt die Notwendigkeit einer gesonderten Modulatorstufe, sodass sich eine Regelungs-dynamik nahe dem theoretischen Maximum ergibt.

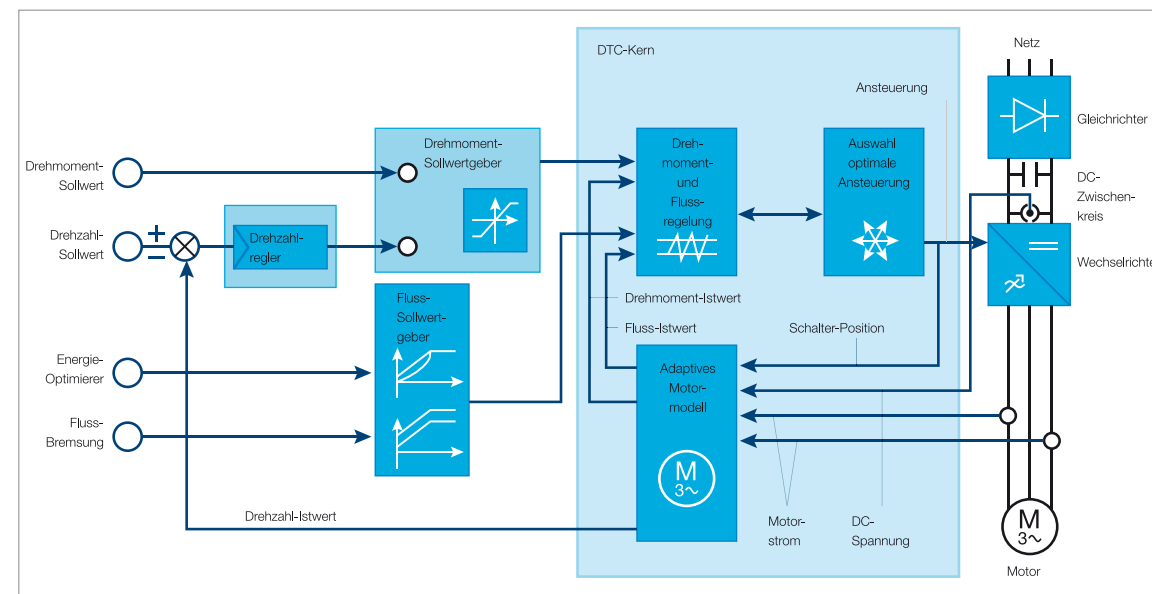


Abb. 1: Übersichtsschaltbild DTC

ABB hat 1995 seinen ersten Frequenzumrichter für die Industrie mit direkter Drehmomentregelung auf den Markt gebracht (Ref. 2).

Im Prinzip war DTC bereits 1995 eine führende Technologie, aber weitere Entwicklungen in der Verarbeitungsleistung von Prozessoren, bei Kommunikationsschnittstellen, der Anwendungsprogrammierung usw. haben eine höher Leistung ermöglicht, die zu einer Verbesserung der Motorregelung in einem breiten Anwendungsspektrum führte.

### Wozu DTC?

Neben der hervorragenden Drehmomentantwort bietet DTC dem Kunden weitere Vorteile:

- Bei 95 % der Anwendungen besteht keine Notwendigkeit für eine Motordrehzahl- oder Lagerrückführung. Deshalb sind keine teuren Drehgeber oder andere Rückführungsgeräte notwendig.
- Die DTC-Regelung gibt es für verschiedene Motortypen einschließlich Permanentmagnetmotoren und die neuen Synchronreluktanzmotoren.

- Exakte Drehmoment- und Drehzahlregelung auch bei niedrigen Drehzahlen sowie volles Anlaufmoment bis zur Nulldrehzahl.
- Exzellente Drehmomentlinearität.
- Hohe statische und dynamische Drehzahlgenauigkeit.
- Keine voreingestellte Schaltfrequenz. Für jeden Regelungszyklus wird die optimale Transistor-schaltung ermittelt, sodass der Antrieb sich schneller an die Anforderungen der Arbeitsmaschine anpassen kann.

In einem größeren Zusammenhang gesehen reichen die Vorteile der DTC in den Bereich der Software, der Benutzerschnittstellen, der Wartung und der Systemmerkmale hinein.

Wie der Name sagt, ist es das Ziel der DTC, den Motorfluss und das Drehmoment direkt zu regeln, anstatt zu versuchen, diese Größen indirekt wie im Fall der Stromrichter und vektorgeregelten Antriebe zu regeln. Separate Drehmoment- und Drehzahlregelkreise bilden das DTC-System, arbeiten aber auf integrierte Weise zusammen (siehe Abb. 1).

Der Kern der DTC ist der Drehmomentregelkreis, in dem ein komplexes, adaptives Motormodell weiterentwickelte, mathematische Algorithmen zur Vorhersage des Motorstatus verwendet. Die primären Regelgrößen – Statorfluss und Drehmoment – werden von dem Motormodell anhand der Motorphasenströme und der DC-Zwischenkreisspannung sowie des Status der Schalttransistoren im Frequenzumrichter exakt berechnet. Das Motormodell berechnet auch die Wellendrehzahl. Durch die Temperaturkompensation kann die Genauigkeit der Berechnung auch ohne Inkrementalgeber verbessert werden.

Weitere Motorparameter werden bei der Inbetriebnahme während des Motoridentifikationslaufs automatisch in das adaptive Modell eingegeben. In vielen Fällen kann die Modellparameter-Identifikation ohne Drehen der Motorwelle durchgeführt werden. Zur Feinabstimmung des Motormodells, die nur bei wenigen Applikationen mit speziellen Anforderungen notwendig ist, muss der Motor drehen, dann aber nur kurzzeitig und ohne Last. Der Ständerwiderstand (Spannungsabfall) ist der einzige und einfach messbare Parameter, der für die Berechnung des Magnetflusses des Motors benötigt wird. Das Motordrehmoment kann dann als Kreuzprodukt der Statorfluss- und Statorstromvektoren berechnet werden. Während der Ständerwiderstand die Hauptquelle eines Berechnungsfehlers ist, sinkt sein Einfluss mit zunehmender Motordrehzahl und Spannung. Somit zeichnet sich die DTC durch eine hervorragende Drehmomentgenauigkeit über einen weiten Drehzahlbereich aus. Außerdem verfügt DTC über weitere Möglichkeiten zur Minimierung des Berechnungsfehlers bei niedriger Motordrehzahl.

Die Ausgangssignale des Motormodells – die den Statorfluss- und Drehmoment-Istwert wiedergeben – gehen in den Flussvergleich bzw. den Drehmomentkomparator ein (Abb. 1). Diese separaten Regelungseinheiten vergleichen ihre Eingänge mit dem Fluss- und Drehmoment Sollwert. Bereits Mitte der 1990er-Jahre führten die ersten

DTC-geregelten Antriebe diese Funktionen alle 25 Mikrosekunden ( $\mu\text{s}$ ) mithilfe eines digitalen Hochgeschwindigkeitsprozessors aus (DSP). Bei der neuesten Regelungsgeneration wurde das Intervall auf 12,5  $\mu\text{s}$  verkürzt und so die Regelungsleistung weiter verbessert. Jeder Vergleich versucht, seine Fluss- oder Drehmomentvektor-Magnitude innerhalb eines engen Hysteresebandes um den Sollwert herum zu halten. Die schnelle Drehmomentantwort ohne Regelbereichsüberschreitung der DTC stammt teilweise von der Fähigkeit, diese Vektorfluktuationen zu minimieren. Die außergewöhnlich gute Motorreaktion ist auch durch die DSP-Regelungsalgorithmen bedingt, die das adaptive Motormodell mit derselben hohen Taktrate aktualisieren.

Fluss- und Drehmomentfehler – Differenzen zwischen den berechneten Werten und den Sollwerten – und die Winkelposition (oder der -sektor) des Statorflussvektors werden in den Hysterese-reglern zur Berechnung des Fluss- und Drehmomentstatus verwendet. Dann werden diese Statuswerte zu Eingängen in den Optimalimpulsselektor, in dem der optimale Spannungsvektor aus der Tabelle eingestellt wird (Abb. 1). So können die optimalen Signalimpulse für jeden Regelungszyklus an die Lastschalter im Wechselrichter gesendet werden, um das präzise Motordrehmoment zu erhalten oder beizubehalten.

Eine Art programmierbarer Logik – ein sogenanntes feldprogrammierbares Gate Array (FPGA) – unterstützt den DSP bei der Bestimmung der Wechselrichter-Schaltlogik und anderen Aufgaben. Das FPGA ermöglicht Regelungsmodifikationen oder eine Aktualisierung der Frequenzumrichter-konstruktion im Gegensatz zu einer anwendungsspezifischen, integrierten Schaltung (ASIC), die, sofern sie verwendet wird, unveränderlich ist. Der Drehzahlregelkreis, der die übrigen DTC-Funktionsbausteine enthält, wird in Anhang 1 beschrieben.

### Leistungsindikatoren

DTC bietet Kunden überlegene Leistungsmerkmale verglichen mit den Antriebsverfahren der Wettbewerber. Da es ein „geberloses“ (Drehzahlberechnung anstelle einer Messung) Regelungsverfahren ist, sind in den meisten Fällen keine kostenintensiven Drehzahl- oder Positionsgeber notwendig. In Abhängigkeit der Motorgröße wird typischerweise eine statische Drehzahlgenauigkeit von  $\pm 0,1\%$  erreicht. Bei höheren Anforderung der Anwendung wird ein DTC-Frequenzumrichter mit einem Standardinkrementalgeber (1.024 Impulse/U) ausgestattet und erreicht dann üblicherweise eine Drehzahlgenauigkeit von  $\pm 0,01\%$ .

Die dynamische Drehzahlgenauigkeit (Zeitintegral der Drehzahlabweichung bei 100 % Lastaufschaltung) beträgt 0,3-0,4 %s bei einer typischen mit einem Motor angetriebenen Maschine. Bei Verwendung eines Inkrementalgebers verbessert sich die Drehzahlgenauigkeit typischerweise auf 0,1 %s und erreicht die Genauigkeit eines Servoantriebs.

Die Drehmomentansprechzeit auf einen 100 % Drehmoment-Sollwertsprung beträgt typischerweise 1-5 Millisekunden (ms), was der physischen Grenze des Motors entspricht. Die der Drehmomentwiederholungsgenauigkeit bei demselben Sollwertbefehl liegt typischerweise bei 1 % des Nennmoments über den Drehzahlbereich des Frequenzumrichters. Bei einer Regelung bei sehr niedrigen Motordrehzahlen liefert DTC 100 % Drehmoment bis hinunter zur Nulldrehzahl – ohne (oder mit) Drehzahlrückführung und bietet bei Verwendung eines Inkrementalgebers eine Lageregelung. Die genannten Leistungswerte beziehen sich speziell auf die Asynchronmotorregelung.

### Jenseits der Asynchronmotoren

DTC wurde ursprünglich für Asynchronmotoren entwickelt, da diese in der Industrie und gewerblichen Anwendungen äußerst populär waren. Zweitfollos wird der Asynchronmotor in naher Zukunft noch seine Rolle als „Arbeitspferd“ behalten. Bei

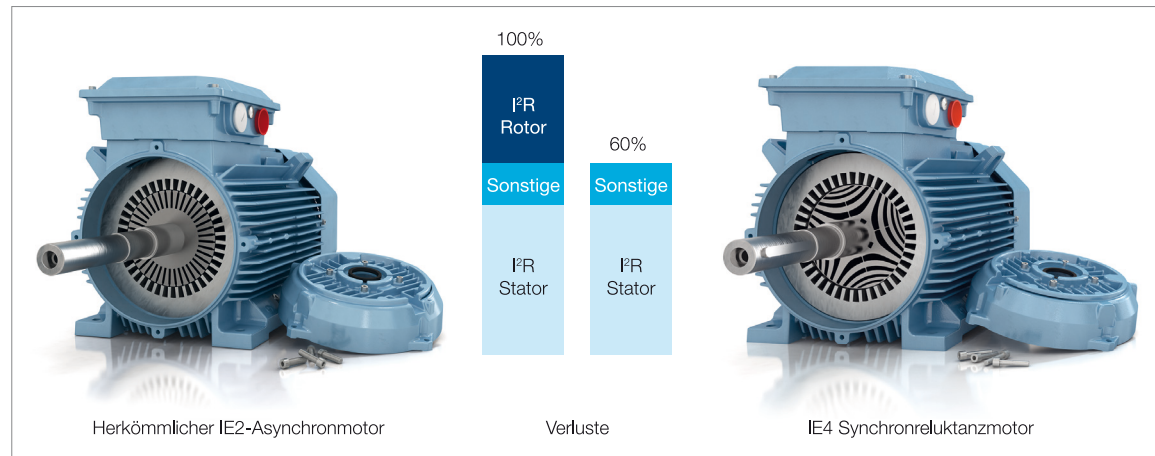
den Bemühungen um eine höhere Leistungsdichte und der Erarbeitung internationaler Wirkungsgradvorschriften wird sich das Interesse auf andere Motortopologien richten.

Die Norm IEC 60034 Teil 30 (Ref. 3) beispielsweise definiert internationale Wirkungsgradklassen (IE-Klassen), deren höchste – IE4 (Super-Premium-Effizienz) – für Asynchronmotoren nur schwer zu erreichen ist. Eine noch höhere Klasse, IE5, wurde vorgeschlagen, obwohl diese in der letzten freigegebenen, zweite Ausgabe der IEC 60034-30 nicht näher spezifiziert wurde.

Die gute Nachricht ist, dass DTC gleichermaßen auf andere Motortypen wie Permanentmagnet-Synchron- und Synchronreluktanzmotoren angewandt werden kann. Der Hauptunterschied betrifft den Anlauf des Motors. Im Gegensatz zu Asynchronmotoren erfordern PM-Synchronmotoren und Synchronreluktanzmotoren, dass das Leitsystem die Rotorposition beim Anlauf aus der Lage der Pole im Rotor berechnet, wenn kein Positionssensor verwendet wird.

Bei diesen Motoren werden die Verluste erheblich reduziert, da es keine Rotorwicklungen und keine Schlupf-Drehzahl-Effekte wie bei Asynchronmotoren gibt. Daraus ergibt sich ein höherer Wirkungsgrad. Synchronbetrieb bedeutet außerdem, dass eine hervorragende Drehzahlgenauigkeit auch ohne Drehzahl- oder Positionsgeber erreicht wird. Deshalb kann in den meisten Fällen auf einen Sensor verzichtet werden, außer bei Anwendungen wie Wänschen und Hubeinrichtungen, die bei längerem Stillstand ein Drehmoment ungleich Null benötigen.

Permanentmagnete werden im Allgemeinen außen am Rotor angebracht. Bei einer Variante des PM-Synchronmotors, dem PM-Motor mit Innenrotor (IPM) sind die Magnete in die Rotorkonstruktion eingebettet. Eine zusätzliche Reluktanzmoment-Komponente, die bei IPM-Synchronmotoren erzeugt wird, „macht sie für Applikationen mit hohen



**Abbildung 2**  
Bei dem neuen Synchronreluktanzmotor wird das neue Rotordesign verwendet und er ist für den Umrichterbetrieb optimiert. Die Technologie reduziert die Rotorverluste, verbessert die Zuverlässigkeit und ermöglicht

kleinere und leichtere Konstruktionen (Pakete mit Hochleistungs-Synchronreluktanzmotor und Frequenzumrichter) oder einen extrem hohen Wirkungsgrad (Pakete mit IE4-Synchronreluktanzmotor und Frequenzumrichter).

Anforderungen attraktiv. Darüber hinaus erzeugen eingebettete Magnete eine sehr deutliche Schenklichkeit des Rotors/der Pole, die eine präzise Drehzahlberechnung ermöglicht und den geberlosen Basisbetriebsmodus der DTC verbessert.

bei den Seltenen Erden hat bei den Maschinenbauern ernste Besorgnis ausgelöst, die weit über die Elektromotoren hinausgeht (Ref. 4). Hier bieten Synchronreluktanzmotoren eine Alternative.

Aufgrund des hohen Drehmoment-Motorgrößen-Verhältnisses kann bei der Verwendung von PM-Synchronmotoren ein einfacherer Antriebsstrang realisiert werden. Bei einem direkt angetriebenen mit niedriger Drehzahl laufenden PM-Motor beispielsweise kann bei Verpackungsmaschinen auf ein Getriebe verzichtet werden.

ABB hat sein Produktangebot um Pakete aus Synchronreluktanzmotor und Frequenzumrichter ergänzt, auch deshalb, weil Versorgungsengpässe bei den Magneten aus Seltenen Erden zu erwarten sind (Ref. 5). Bei Synchronreluktanzmotoren ähnelt die Statorstruktur der von Asynchronmotoren. Der Rotor besteht jedoch aus axialen Blechpaketen, die so gestaltet sind, dass sich ein Querschnitt mit vier Polen ergibt – abwechselnd hoch durchlässige (Eisen) Achsen und gering durchlässige (Luft) Achsen. Wichtig ist, dass der Rotor keine Magnete benötigt.

Zu den Einsatzmöglichkeiten für PM-Synchronmotoren gehören Werkzeugmaschinen, Schiffsantriebe, Windturbinen (Generatoren), und Kühllüfter für Kraftwerke.

Typische Synchronreluktanzmotor-Applikationen sind Pumpen und Lüfter, bei denen ein quadratisches Drehmoment (und so eine Leistung der dritten Potenz) in Bezug auf die Drehzahl vorliegt (siehe unten).

Ein gewisser wirtschaftlicher Nachteil der PM-Synchronmotoren besteht darin, dass sie für eine optimale Leistung Magnete aus Seltenen Erden benötigen. Am häufigsten wird ein Verbund aus Neodym-Eisen-Bor verwendet. Die jüngste Preisentwicklung und globale Versorgungsengpässe

Für PM-Synchron- und Synchronreluktanzmotoren modifizierte DTC-Versionen wurden von ABB bereits realisiert. Für Kunden ist es wichtig, dass bestehende Asynchronmotor-Applikationen mit PM-Synchron- oder Synchronreluktanzmotoren nachgerüstet werden können, um von der verbesserten Leistung zu profitieren.

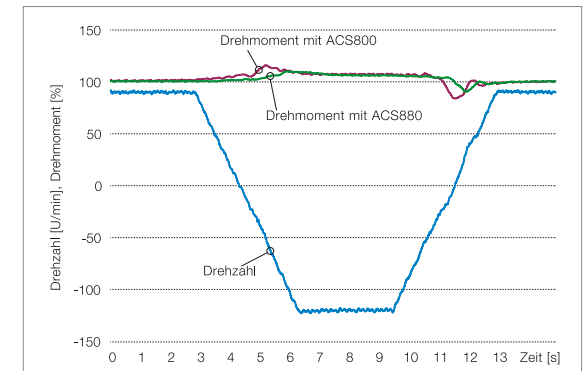
Zusätzlich zu der hohen Motorregeldynamik ermöglichen DTC-Frequenzumrichter – in Kombination mit der oben genannten, effizienten Motortechnik – bei einer Vielzahl drehzahl geregelter Pumpen und Lüfterapplikationen erhebliche Energieeinsparungen. Dies kann anhand der sogenannten „Affinitätsgesetze“ für Pumpen und Lüfter gezeigt werden, die Variablen wie Durchflussmenge, Pumpendrehzahl, Druck, Leistung usw. zueinander in Beziehung setzen. Beispielsweise besteht zwischen Pumpe und Leistung ein kubisches Verhältnis, d. h. wenn der Prozessablauf es zulässt, dass die Pumpe mit der Hälfte der vollen Drehzahl läuft, aber nur 1/8 der vollen Leistung erforderlich ist. Ein reduzierter Wirkungsgrad des Motors und des Frequenzumrichters bei Teillast würde den „Anlagenwirkungsgrad“ reduzieren, aber der Energieverbrauch insgesamt würde sinken.

#### Aktuelle Leistungsbewertung

Mitte 2012 hat ABB eine Reihe von Messungen vorgenommen, um sicherzustellen, dass die kontinuierlichen Verbesserungen der DTC-Technik weiterhin die Frequenzumrichter auf Spitzenniveau halten. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

#### Drehmomentstabilität nahe Nulldrehzahl (ACS800 vs. ACS880 Drives)

Die ACS800 und die neuen ACS880 Industrial Drive-Frequenzumrichter von ABB wurden bei geberlosem Betrieb (ohne Rückführung) im Hinblick auf ihre Drehmomentregelungsgenauigkeit verglichen (Grafik 1). Jeder Frequenzumrichter hat einen vierpoligen 15-kW-Asynchronmotor mit Nenndrehmoment angetrieben, wobei die Maschine so geregelt wurde, dass nahe Nulldrehzahl Drehzahlum-

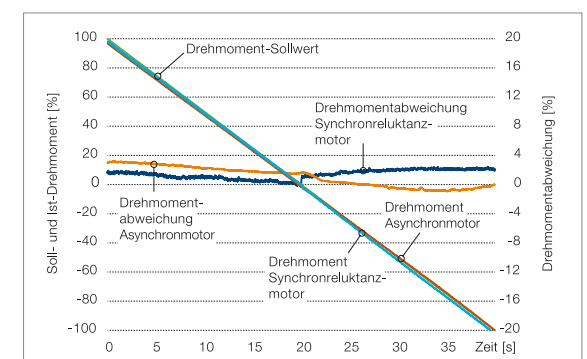


**Grafik 1**  
Beide Antriebe zeigen beim Betrieb über längere Zeiträume nahe Nulldrehzahl geberlose eine bemerkenswerte Regelfähigkeit, wobei der neue ACS880 eine geringere Abweichung vom Drehmomentsollwert aufweist und so eine bessere Motorregelungsleistung bietet.

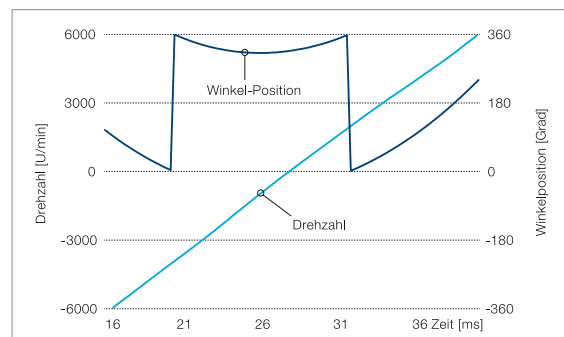
kehrungen durchgeführt wurden. (Hinweis: 90 U/min sind ca. 6 % der Motornendrehzahl.)

#### Drehmomentgenauigkeit entlang der Rampe (Asynchronmotor vs. Synchronreluktanzmotor)

Die geberlose Genauigkeit der Drehmomentregelung des Frequenzumrichters ACS880 wurde anhand eines vierpoligen Asynchronmotors und eines Synchronreluktanzmotors mit 15 kW (bei 50 % Nenndrehzahl) gemessen (Grafik 2).



**Grafik 2**  
DTC hielt die Drehmomentabweichung bei beiden Motortypen bei wenigen Prozent des Nenndrehmoments, so wohl im Motor- als auch im Bremsbetrieb. Die maximale Drehmomentabweichung ist beim Synchronreluktanzmotor etwas geringer als beim Asynchronmotor.



**Grafik 3**  
Obwohl der ACS880 kein Servoantrieb ist, ermöglichte DTC sowohl mit als auch ohne Drehgeber eine schnelle, exakte Motorbeschleunigung. Der Vergleich der gemessenen Beschleunigungszeit mit der mechanischen Zeitkonstante des Motors liefert ein Maß für die Drehmomentgenauigkeit während einer extrem schnellen Beschleunigung. Beschleunigungszeiten von 24,4 ms (100 % Drehmoment) und 12,1 ms (200 % Drehmoment) wurden in der Betriebsart „Ohne Rückführung“ gemessen, verglichen mit 24 ms bzw. 12 ms, die den Beschleunigungszeiten für die absolute Drehmomentgenauigkeit entsprechen.

### Dynamik der Servoklasse

Drehzahl und Winkelposition eines PM-Synchronmotors mit 1,5 Nm und 6.000 U/min (bei einem Rotor-Trägheitsmoment von 0,57 kg cm<sup>2</sup>) wurden bei der Drehzahlumkehr zwischen ±6.000 U/min in weniger als 25 Millisekunden (ms) gemessen (Grafik 3). Dieser Wert liegt sehr nahe bei der theoretischen Grenze, die mit dem auf das doppelte Nennmoment eingestellten Drehmomentgrenzwert erreicht werden kann. Die theoretische Grenze bezieht sich auf die mechanische Zeitkonstante des Motors von 24 ms; sie ist die zur Beschleunigung des Motors von Null auf die Nenndrehzahl bei Nennmoment benötigte Zeit.

### Breiterer Anwendungsbereich

Ein weiterer Aspekt der DTC-Story ist die Erweiterung über den Bereich hinaus, für den diese Technik entwickelt wurde, auf andere Applikationen. Anspruchsvolle, hochdynamische Anwendungen wurden bereits früh ins Auge gefasst, denn sie konnten kostenintensive Software-Entwicklungen

unter Verwendung vorhandener Mikroprozessoren rechtfertigen. Dieses Szenario hat sich grundlegend geändert. Die Leitsystem-Software hat sich über das zunehmende Verkaufsvolumen der Frequenzrichter amortisiert und den Einsatz der Frequenzrichter bei Standardapplikationen wirtschaftlich gerechtfertigt. Hochleistungs-DSPs haben sich ebenfalls verbreitet und wurden erschwinglich.

Die Fähigkeit, schnell auf Änderungen der Prozessgrößen wie Druck, Zug oder Position mit Hilfe der Drehzahl- und Drehmomentdynamik reagieren zu können, macht DTC für weitere Industrie- und Prozessapplikationen attraktiv.

DTC verfügt über Funktionen zum Schutz der angeschlossenen Maschine oder des Motors selbst (siehe Anhang 2). Eine präzise Drehmomentregelung kann die Drehzahlreglerabstimmung optimieren, um Drehschwingungen zu dämpfen.

DTC wird zur Reduzierung der Oberschwingungen des Antriebs verwendet und verbessert dabei auch die Netzqualität. Niederfrequente Oberschwingungen können im Netzstrom durch Austausch des Diodengleichrichters eines Frequenzrichters durch eine DTC-geregelte IGBT-Einspeiseeinheit (ISU) reduziert werden. Der LCL-Filter einer ISU entfernt hochfrequente Oberschwingungen und verbessert die Netzfilterung. In vielen Fällen kann sogar eine Spannungsverzerrung im Netz durch einen mit einer ISU ausgestatteten Frequenzrichter reduziert werden. Mit einer ISU ist es möglich, Bremsenergie in das Netz zurückzuspeisen. So können bei Anwendungen mit häufigen Bremsvorgängen Energiekosten gespart werden.

### DTC heute und morgen

Die auf einer stabilen theoretischen Basis aufbauende direkte Drehmomentregelung zeichnet sich über einen Zeitraum von mehr als 25 Jahren durch kontinuierliche Hardware- und Software-Verbesserungen aus. DTC war von Anfang an eine auf DSP-basierende Technologie und hat die durch

frühere Prozessoren bedingte Einschränkungen bei der schnellen Ausführung der Regelalgorithmen überwunden. Die durch die DSP vorgegebenen Grenzen haben in der Vergangenheit auch die maximale Schaltfrequenz des Frequenzrichters und somit die Ausgangsfrequenz eingeschränkt. DTC basiert auf der schnellen Schaltung der Antriebstransistoren für eine optimale Leistung und die rechtzeitige Aktualisierung der Motormodell-Parameter. Leistungsstarke Prozessoren sind jetzt problemlos verfügbar.

Heute haben DTC-Frequenzrichter eine höhere Ausgangsfrequenz, sodass höhere Motorendrehzahlen möglich sind. Dies ist für bestimmte Anwendungen, wie Prüfstände und Werkzeugmaschinen, ein wichtiger Aspekt. ABB-Frequenzrichter, die in einer Industrieapplikation Asynchronmotoren antreiben, liefern üblicherweise eine Schaltfrequenz von 2-4 kHz zur Erhöhung des Wirkungsgrads, während ABB Machinery Drive-Frequenzrichter, die PM-Synchronmotoren antreiben, üblicherweise 5-8 kHz liefern, um die Motoren mit bestmöglicher Dynamik zu regeln.

Die Software war ein weiteres Schlüsselement beim Erfolg der DTC. Zu den Verbesserungen und Updates gehören ein für das gesamte Leitsystem (von der Kundenschnittstelle bis zur Motorwelle) überarbeiteter und optimierter Code zur weiteren Verbesserung der Ansprechzeit und der Leistung des Frequenzrichters.

Auch die Motormodelle werden ständig aktualisiert. Die Regelalgorithmen werden regelmäßig analysiert und die sich ergebenden Verbesserungen werden im Labor an verschiedenen Motoren sorgfältig überprüft. Hierbei werden auch neue Merkmale oder regelungstechnische Ideen an einem vorhandenen oder modifizierten Motor getestet oder spezielle Kundenanforderungen genauer untersucht.

Nachdem eine Verbesserung bestätigt ist, kann sie im Rahmen des normalen Designablaufs in die nächste Software-Version einfließen. Mit jeder

Software-Version werden neue Funktionen oder eine bessere Regelungsleistung realisiert. Wenn die Lösung eines Kundenproblems von generellem Interesse ist, kann sie auch in eine spätere Software-Version aufgenommen werden.

Die DTC wurde mit einem robusteren Motoridentifikationsalgorithmus ausgestattet. Dank des leistungsfähigeren Mikroprozessors in dem Frequenzrichter verbessert diese Software die Motoridentifikation bei Stillstand. Wie bereits erwähnt, ermittelt der Identifikationsalgorithmus bei einem Motor automatisch die passenden Eigenschaften für die optimale Regelungsabstimmung bei der Inbetriebnahme des Frequenzrichters – selbst dann, wenn die Leistungsschildangaben nicht bekannt oder nicht korrekt sind.

Die anerkannte Erfahrung von ABB in der Antriebstechnik und bedeutende Ressourcen sind in die Entwicklung der direkten Drehmomentregelung eingeflossen. Heute ist DTC eine lebendige Technologie. Sie hat sich durch intelligente Benutzerschnittstellen, Antriebsdiagnosefunktionen und Anlagensoftware zu einer Marke entwickelt, die über die reine „Drehmomentregelung“ hinausgeht. Künftig wird ABB diesen Weg mit der bewährten DTC-Technologie weiter verfolgen. Kunden, die Frequenzrichter von ABB verwenden, können darauf vertrauen, dass die Vorteile der direkten Drehmomentregelung, in die sie heute investieren, auch langfristig Nutzen bringen werden.

Hilfe beim Verständnis der hier verwendeten technischen Fachbegriffe finden Sie unter: [www.abb.com/glossary](http://www.abb.com/glossary)

## Referenzen

- 1) Kazmierkowski, M.P., et al; *High-Performance Motor Drives*, IEEE Industrial Electronics Magazine, Sept. 2011, Vol. 5, No. 3 (p. 6-26).
- 2) *Direct Torque Control Comes to AC Drives*“ Control Engineering, March 1995, Vol. 42, No. 3 (p. 9).
- 3) Standard IEC 60034-30, Ed.2: *Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes (IE-code)*, International Electrotechnical Commission. [www.iec.ch](http://www.iec.ch)
- 4) *Rare-earth magnet supply and cost issues*, Control Engineering, Aug. 2011. [http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=55091](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=55091)
- 5) *Super premium efficiency synchronous motor and drive package: Taking energy efficiency to a new level*, ABB Low-voltage AC motors and drives brochure (2011).

## Anhang 1 Der Rest der Geschichte der Funktionsbausteine für DTC

In dem Hauptartikel ist die Funktionsweise des DTC-Drehmomentregelkreises beschrieben. Nachfolgend wird der dazugehörige Drehzahlregelkreis kurz beschrieben. Diese beiden Regelkreise sind integriert und arbeiten als Einheit. Eine separate Beschreibung dient nur einem besseren Verständnis des Blockschalbildes. Dies ist nun der Rest des „Spaziergangs um den Block“.

Der Drehzahlregelkreis besteht aus drei Hauptelementen: dem Drehzahlregelungsbaustein selbst und den separaten Drehmomentsollwert- und Flusssollwertreglern. Der Drehzahlregler umfasst einen PID-(Proportional-Integral-Differenzial)-Regler und einen Beschleunigungskompensator. Der Drehzahlreglereingang ist die Abweichung, die beim Vergleich eines externen Drehzahlsollwertsignals und des Drehzahlwertsignals von dem adaptiven Motormodell erkannt wird – Teil des Drehmoment- und Flussregelkreises (siehe Hauptartikel). Dieses aus der Drehzahlsollwertänderung und dem D-Anteil errechnete Fehlersignal geht sowohl in die PID-Einheit und als auch den Beschleunigungskompensator ein. Ihre kombinierten Ausgänge ergeben den Drehzahlreglerausgangswert.

Dieser Ausgangswert wird an den Drehmomentsollwertregler gesendet, in dem der Drehzahlreglerausgang auf die voreingestellten Drehmomentgrenzwerte und die DC-Zwischenkreisspannung geregelt wird. Ein externes (oder vom Nutzer vorgegebenes) Drehmomentsollwertsignal kann auch anstelle der Drehzahlregelung als Eingang in diesen Baustein verwendet werden. Der Drehmomentsollwert-Reglerausgang ist der sogenannte „interne Drehmomentsollwert“, der in den Drehmoment-Komparatorbaustein im Drehmoment- und Flussregelkreis eingeht.

Ebenso gibt der Flusssollwertregler einen „internen Flusssollwert“ in den Flusskomparatorbaustein (Teil des Drehmoment- und Flussregelkreises) ein. Dieses Signal ist ein Statorfluss-Absolutwert, den die DTC entsprechend regeln und modifizieren kann, um sinnvolle Wechselrichterfunktionen zu erhalten.

Beispiele sind die Energie-Optimierung – die die Motorverluste und das Motorgeräusch reduziert – und die Flussbremsung, die durch eine vorübergehende Erhöhung der Motorverluste ein schnelleres Abbremsen des Motors ermöglicht, wenn kein spezieller Bremswiderstand verwendet wird.

## Anhang 2

### Vorteile der DTC für den Kunden

Frequenzumrichter mit direkter Drehmomentregelung (DTC) besitzen verschiedene Merkmale, die Vorteile für speziellen Nutzeranwendungen bieten. Bei der Papierherstellung, der Herstellung von Bahnmaterialien und bei Extrudern für die Folienproduktion können Kunden sich auf die schnelle Drehmomentantwort und die exakte Drehmomentregelung der DTC verlassen, die eine einheitlichere Produktqualität und eine höhere Prozessleistung ermöglicht. Die Drehmomentlinearität ist ein weiterer Vorteil beim Wickeln des Materials mit konstantem Zug auf Rollen.

Eine Kostenreduzierung bei Förderanlagen und Transferstraßen sowie bei Verpackungsmaschinen ist möglich, denn bei vielen Applikationen sind keine Inkrementalgeber oder anderen Motordrehzahl-/Lagerückführungsgeräte notwendig. Abgesehen von den Anfangskosten müssen Inkrementalgeber gewartet und die Genauigkeit geprüft werden. Außerdem können die Hersteller von Verpackungsmaschinen wegen der Drehmomentregelung bis auf Nulldrehzahl durch DTC – Halten des 100%igen Drehmoments bei Nulldrehzahl – auf eine mechanische Bremse verzichten. Jedoch ist ein Drehzahl- oder Positionsgeber notwendig, wenn für eine Dauer von mehr als wenigen Sekunden ein Brems- (generatorisches) Moment nahe Nulldrehzahl erforderlich ist. Auch muss der Frequenzumrichter mit einem Bremswiderstand oder IGBT-Einspeisemodul ausgestattet sein, wenn eine schnelle Verzögerung einer hohen Last notwendig ist.

Auch andere Applikationen können von der präzisen Überwachung des Motorzustands profitieren. Die Minimierung von Überlast und Stoßbelastungen wird durch die rechtzeitige Erkennung geänderter Systemparameter und der hohen Regelungsgeschwindigkeit der DTC möglich. Das Konzept kann auf die Erkennung eines Ausfalls des angetriebenen Systems erweitert werden. So kann der plötzliche Verlust des Drehmoments auf einen Riss des Förderbandes hinweisen – oder wenn ein höheres Drehmoment als üblich für dieselbe Produktions-

menge notwendig ist, kann dies auf eine Blockierung oder einen anormalen Verschleiß der Maschine hinweisen – in beiden Fällen muss der Nutzer reagieren, um weitere Schäden zu vermeiden.

Wie in dem Hauptartikel beschrieben, können Frequenzumrichter in die Prozessdiagnose eingebunden werden. Dies ist für Kunden mit leittechnischen Applikationen vorteilhaft, denn Änderungen der Variablen des angetriebenen Systems wie Druck, Zug oder Position können auf Charakteristika des Motordrehmoments und der -drehzahl bezogen werden. Eine veränderte Motorcharakteristik kann ein erstes Warnzeichen ungewollter Prozessänderungen sein.

## Haftungsausschluss

Dieses Dokument dient nur der Information und hilft Benutzern, Planern, Herstellern von Maschinen beim besseren Verständnis der Anforderungen der EU-Maschinenrichtlinie sowie der Maßnahmen zur Einhaltung der Richtlinie und der dazugehörigen harmonisierten Normen.

Dieses Dokument ist nicht wörtlich zu nehmen, sondern nur eine informative Anleitung. Die in dieser Druckschrift enthaltenen Informationen und Beispiele sind nur für den allgemeinen Gebrauch vorgesehen und enthalten nicht die notwendigen Einzelheiten zur Realisierung eines Sicherheitssystems.

Keinesfalls haftet die ABB Automation Products GmbH für Verluste oder Schäden, weder direkten noch indirekten, die sich aus der Verwendung dieses Dokuments oder den darin enthaltenen Informationen ergeben oder damit in Zusammenhang stehen.

# Kontakt

ABB Automation Products GmbH  
Wallstadter Straße 59  
DE-68526 Ladenburg  
Deutschland  
[motors.drives@de.abb.com](mailto:motors.drives@de.abb.com)