

# *Whitepaper*

## **BG Motoren mit feldorientierter Regelung**



**Dr. Bruno Basler | Head of R&D Predevelopment  
Dunkermotoren GmbH**

Die Integration der Leistungselektronik in einen bürstenlosen Gleichstrommotor (BG-Motor) ermöglicht nicht nur die Ansteuerung des Motors auf sehr einfache und elegante Weise, sondern bietet eine Vielzahl von implementierbaren Regelungsalgorithmen. Stand der Technik ist die feldorientierte Regelung (FOC), basierend auf der mathematischen Beschreibung des Motors und der Überführung von Wechselgrößen in Gleichgrößen. Die FOC bietet dabei Vorteile für die Leistungselektronik, verbessert das dynamische Verhalten und liefert ein optimales Drehmoment. Ein glattes Drehmoment ist einer der wichtigsten Qualitätsparameter für den Betrieb elektrischer Antriebe, denn Drehmomentharmonische können zu mechanischen Schwingungen im kompletten Antriebssystem führen. Drehmomentschwankungen sind oft für die angeschlossenen Lasten schädlich. Getriebe zwischen den Motoren und den Lastmaschinen sind aufgrund dieser Schwankungen besonders gefährdet. Zusätzlich können die Drehmomentharmonischen zur einer erhöhten Geräuschentwicklung beitragen.

Aus Sicht der Regelungstechnik ist die FOC vergleichbar mit der Regelung eines bürstenbehafteten Gleichstrommotors. Durch die Entkopplung von magnetischem Fluss und dem Drehmoment wird das typische Verhalten eines bürstenbehafteten Gleichstrommotors (GR-Motor) erreicht. Das Grundkonzept der FOC ist die Betrachtung von zeitlichen Momentanwerten. Somit werden die elektrischen Wechselgrößen eines dreiphasigen Motors nicht als raumfest behandelt, sondern drehen sich mit dem Rotor. Das bedeutet, dass die am Stator gemessenen drei Phasenströme in Rotorkoordinaten umgewandelt werden. Da das Bezugssystem statisch ist, kann der Regler mit Gleichstromgrößen anstelle von Wechselgrößen arbeiten.

Grundsätzlich gibt es zwei allgemeine Methoden der FOC. Beide Verfahren unterscheiden sich in der Art, wie der Rotorwinkel bzw. die Lageerfassung bestimmt wird. Bei der direkten FOC wird der Winkel durch Klemmenspannung und die Klemmenströme berechnet, während bei der indirekten FOC die Rotorposition gemessen wird. Somit wird bei der indirekten FOC eine zusätzliche Positionserfassung benötigt. Voraussetzung für beide Verfahren und eine gute Regelgüte ist, dass die Motorparameter des Reglers mit den tatsächlichen Parametern des Motors übereinstimmen.

Die Gleichgrößen werden in eine feldbildende ( $d$ ) und in eine drehmomentbildende ( $q$ ) Komponente unterteilt. Da der magnetische Fluss im Luftspalt ausschließlich durch die Permanenterregung aufgebaut wird, weisen die Ständerströme nahezu keine flussbildende Komponente auf. Aufgrund der Oberflächenmagnete des Rotors wird der Sollwert für den feldbildenden Strom ( $I_d$ ) auf null gesetzt. Der Ausgang des Stromreglers repräsentiert die Referenzspannungen in den Rotor-Koordinaten. Zur Steuerung des dreiphasigen Statorstroms erzeugt der FOC-Algorithmus einen dreiphasigen Spannungsvektor. Grundlage hierfür ist die Überführung der rotorfesten  $d/q$ -Größen in statorfeste  $\alpha/\beta$ -Größen. Die Umwandlung des physikalischen Stroms in einen Drehvektor mit Hilfe der Clarke- und Park-Transformationen macht das Drehmoment und den magnetischen Fluss zu zeitunabhängigen Größen. Als Regelalgorithmus wird ein erweiterter Proportional-Integral (PI) Regler mit den Parametern Proportionalverstärkung und Nachstellzeit verwendet. Diese Parameter sind abhängig von der Motorinduktivität, dem Wicklungswiderstand, sowie der kompletten Signalverarbeitungskette.

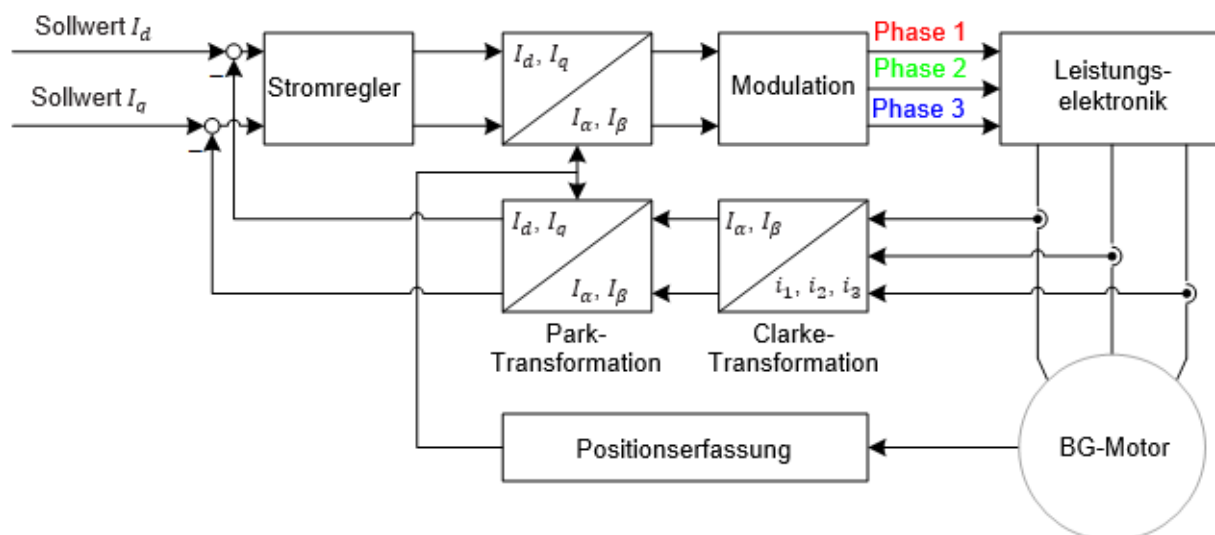
Gleichstrommotoren sind so ausgelegt, dass der Magnetfluss in Stator und Rotor jeweils um  $90^\circ$  zueinander versetzt sind, wodurch der Motor maximales Drehmoment erzeugt. Mit der FOC-Technik werden die Motorströme in Zweiachsen-Vektoren transformiert, die vergleichbar mit denen in einem Gleichstrommotor sind.

Der Prozess beginnt mit einer Messung der drei Phasenströme des Motors ( $i_1$ ,  $i_2$  und  $i_3$ ). Weil die Summe der drei Stromwerte zu jedem Zeitpunkt gleich null ist, werden in der Praxis nur zwei der drei Ströme gemessen und der Wert des dritten Stroms kann aus den erzielten Messwerten

errechnet werden. Daraus ergibt sich eine unmittelbare Senkung der Hardware-Kosten, da nur zwei Stromsensoren notwendig sind. Mit der Information der Statorströme und des Rotorwinkels werden die Werte in ein Koordinatensystem transformiert, um die Polarkoordinaten, bestehend aus Betrag und Winkel, zu berechnen. Dies bedeutet, dass gemessene Motorströme mathematisch von einem dreiphasigen statischen Referenzsystem der Statorwicklung in ein rotierendes Referenzsystem transformiert werden. Das rotierende System bestehend aus der d und der q Komponente lässt sich sehr einfach durch einen PI-Regler verarbeiten. In ähnlicher Weise werden die an den Motor anzulegenden Spannungen mathematisch aus dem d/q-System des Rotors in ein dreiphasiges Bezugssystem überführt. Wird ein sinusförmiger Eingangsstrom an den Stator angelegt, so entsteht dabei ein rotierender magnetischer Fluss. Die Drehzahl des Rotors steht dabei in einer direkten Beziehung zum dem sich drehenden Magnetfluss.

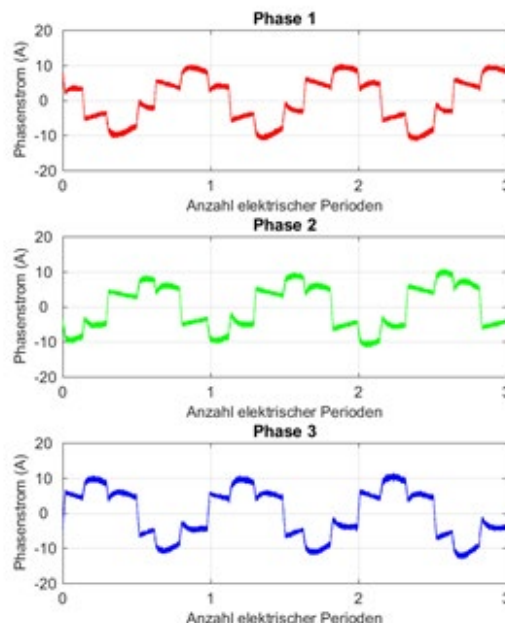
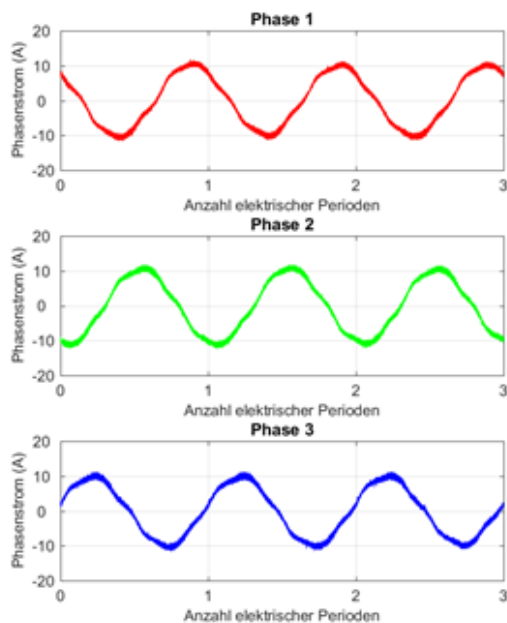
Anhand moderner Mikroprozessoren, präziser Stromerfassung und einer schnellen Leistungselektronik lässt sich das Drehmoment und die Drehzahl des Motors sehr gut regeln. Mit Hilfe einer Pulsweitenmodulation (PWM) werden die Betrag- und Winkel-Werte in dreiphasige Ströme konvertiert, indem die High- und Low-Side-Schalter des Wechselrichters entsprechend angesteuert werden. Somit wird die Gleichspannung durch Schalten der Leistungstransistoren auf die jeweiligen Motorphasen geschaltet und ein bestimmter Strom per PWM eingeprägt. Ziel der Modulation ist die Nachstellung einer sinusförmigen Spannung. Als Leistungshalbleiter der drei Halbbrücken werden MOSFETs eingesetzt. Des Weiteren besteht die Leistungselektronik aus einer Zwischenkreiskapazität und zusätzlicher Filtertechnik. Die Steuerelektronik übernimmt hierbei nicht nur die Regelung und Ansteuerung des Elektromotors, sondern auch Kommunikationsaufgaben und Überwachungsfunktionen. Die Messung des Stromes muss zyklisch erfolgen, damit bei jedem PWM-Takt ein neuer Istwert vorliegt und von der Regelung verarbeitet werden kann. Besonders wichtig ist eine schnelle Erfassung und Verarbeitung des gemessenen Stromes, sodass dieser sich nicht merklich während der Laufzeit des Programmes ändert.

Bei der FOC-Methode wird die dreisträngige Wicklung des Motors durch PWM-Signale der Modulation sinusförmig gespeist. Aufgrund der prinzipiell endlichen Ein- und Ausschaltzeiten der Leistungshalbleiter werden deren Ansteuersignale künstlich verzögert, um beim Umschalten zwischen positiver und negativer Zwischenkreisspannung keinen Brückenkurzschluss zu verursachen.



Die feldorientierte Regelung benötigt eine relativ hohe Rechenzeit, da die rotierenden Größen,

um sie im Regelkreis zu benutzen, zunächst umgewandelt werden müssen und anschließend die Stellgrößen zurückgewandelt werden müssen. Nachteilig ist hierbei der hohe Rechenaufwand für den Mikrocontroller, dessen Leistungsfähigkeit das dynamische Verhalten der Regelung begrenzt. Mit der FOC ist es jedoch möglich, das Drehmoment und den Fluss separat zu steuern. Auf diese Weise haben die BG-Motoren die gleichen Vorteile wie die Gleichstrommotoren. Gegenüber einer direkten Stromregelung ermöglicht die feldorientierte Regelung eine höhere Spannungsausnutzung und reduziert bei gleicher Leistung die stromproportionalen Verluste. Dieses Verfahren ermöglicht somit einen besseren Wirkungsgrad als die direkte Stromregelung.



Feldorientierte Regelung (FOC)

Blockkommutierung

### Vergleich der Regelung- und Ansteuerungsarten am Beispiel eines BG 65Sx25 24 V

Im Vergleich zur block- oder trapezförmigen Kommutierung erzeugt die FOC ein maximales Drehmoment, welches besser auf das Rotorfeld ausgerichtet ist. Der Wirkungsgrad kann durch die sinusförmigen Spannungen und Ströme der FOC erhöht werden. Die Übergänge zwischen den Statorzuständen erfolgt homogen, was die Drehmomenteinbrüche bei der Blockkommutierung beseitigt und die Dynamik des Gesamtsystems verbessert.

Ihr Kontakt für Public Relations:  
 Janina Dietsche | janina.dietsche@ametec.com  
 Tel.: +49 (0)7703/930-546