

# Elektronik

Fachzeitschrift für industrielle Anwender und Entwickler

Titelthema:

## Der richtige Dreh

>> Seite 38

**Transceiver sendet linear und empfängt digital**

>> Seite 42

**DC/DC-Wandler für Power over Ethernet**

>> Seite 55

**Energiefresser vom Markt: EU will 20 % bis 2020 einsparen**

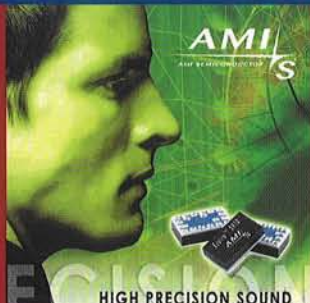
>> Seite 65

**Neuheiten zur Medizinelektronik**

>> ab Seite 32



### SPEZIAL ELEKTRONIK MEDICAL



**Hilfe für die Hörhilfe**

>> Seite 70

**EMV-Regeln für Medizin-Produkte**

>> Seite 76

**Hybride Mikrosysteme für „Life Science“**

>> Seite 84

**Neues Designkonzept: Rekonfigurierbare Signalprozessoren**

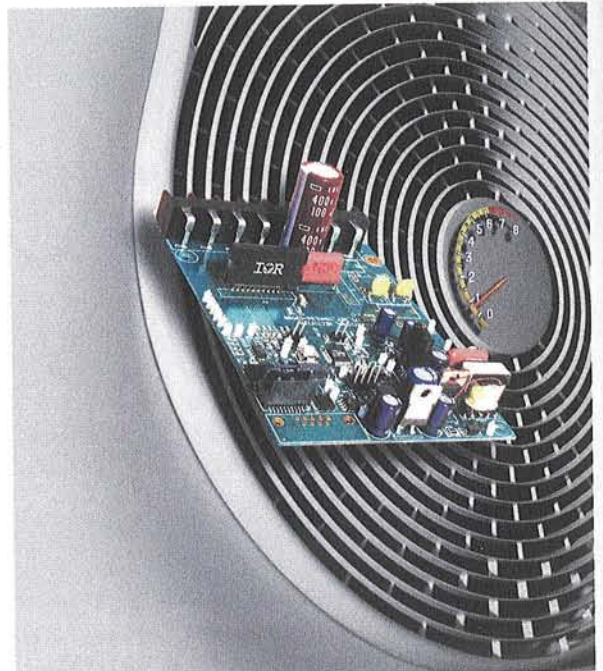


# Der richtige Dreh!

## Permanentmagnet-Synchronmotoren-Regelung für drehzahlveränderliche Ventilatoren und andere natürlich rotierende Lasten

Verschiedenartige geberlose Regelstrategien für Permanentmagnet-Synchronmotoren wurden bereits mit dem Ziel entwickelt, energieeffiziente drehzahlgeregelte Antriebe für kostensensitive Anwendungen zu schaffen. Solange sich der Rotor im Stillstand befindet, ist der Startvorgang unkompliziert. Eine natürlich rotierende Last, wie der träge Ventilator einer Klimaanlage, verkompliziert jedoch den Regelvorgang.

Von Dr. Aengus Murray



Permanentmagnet-Synchronmotoren (PMSM) werden mittlerweile weltweit in zahlreichen Einsatzgebieten wie Haushaltsgeräten und Klimaanlage bevorzugt, weil sie einen wesentlich höheren Wirkungsgrad aufweisen als ein herkömmlicher Induktionsmotor, insbesondere bei drehzahlveränderlichem Betrieb.

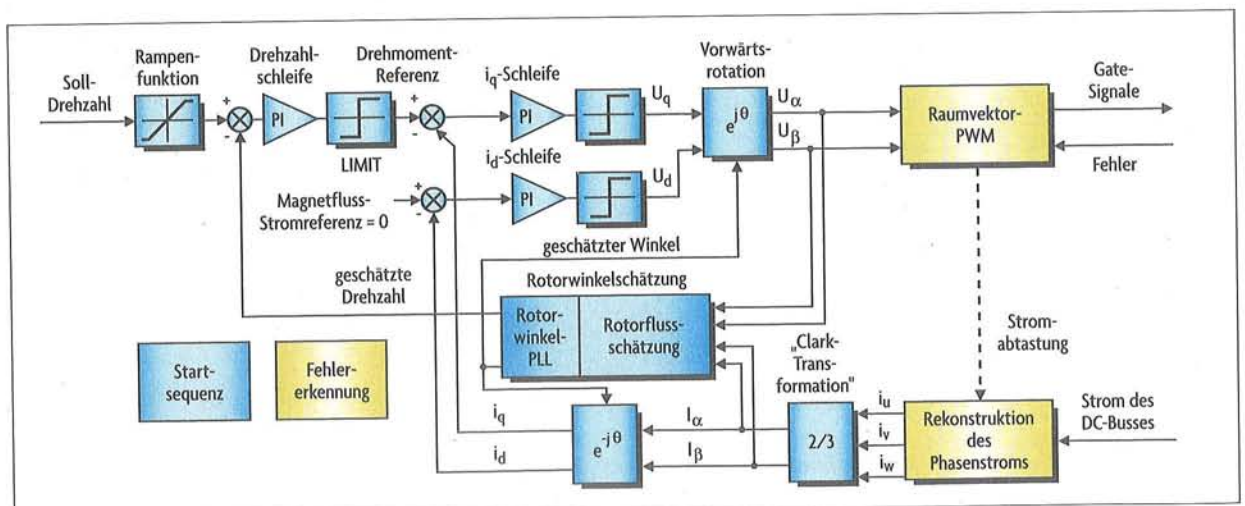
Viele Regler, die jetzt auf den Markt kommen, implementieren eine auf dem Rotor-FOC-Prinzip basierende Regelstrategie (Field Oriented Control – feldorientierte Regelung des Rotors), weil damit der Motor mit seinem höchsten Wirkungsgrad betrieben wird. Bei diesem Rotor-FOC-Prinzip erzeugt die

Stromkomponente des Stators mit der Position des Rotorfelds ein Drehmoment. Zum Erreichen eines Maximalwerts für die Größe Drehmoment/Ampere wird die auf die Rotorfeldrichtung ausgerichtete Komponente des Statorstroms auf Null geregelt.

### ■ Feldorientierte Regelung

Bild 1 zeigt die Blockschaltung eines FOC-Reglers. Zur Implementierung einer auf den Rotor bezogenen FOC

werden alle Motorvariablen in das rotierende „dq“-Koordinatensystem transformiert, das auf die Rotorfeldposition ausgerichtet ist. Die Motorfluss- und die Drehmomentregelung des Motors bestehen aus zwei Rückkopplungsschleifen: einem Längsstrom-Regelkreis ( $i_d$ ) und einem Quersstrom-Regelkreis ( $i_q$ ). Der Regelkreis für die Drehzahl stellt den Referenz-



! Bild 1. Reglerprinzip für die Motoransteuerung per „Field Oriented Control“.



eingang für die Regelung des Querstroms zur Verfügung, während der Referenzwert für den Strom in Längsrichtung Null ist. Diese Vorgehensweise zur Regelung erhöht den Motorwirkungsgrad auf ein Maximum, weil der Motorstrom um  $90^\circ$  zum Rotorfeld versetzt ist. Alle drei Regelkreise setzen Proportional- und Integral-Regler (PI-Regler) ein. Der Drehzahlregelkreis regelt die mechanische Geschwindigkeit durch Errechnen der Motordrehzahl, die erforderlich ist, um den Drehzahlfehler auf Null zu halten. Das Integral-Rückkopplungsglied zwingt den statischen Fehler auf Null, da bereits ein geringfügiger Fehler eine Änderung des Ausgangswerts erzwingen würde. Das proportionale Rückführungsglied reagiert unmittelbar auf Fehlerveränderungen und bestimmt dadurch das Dynamikverhalten des Regelkreises. Der Wert des Integralglieds ist sowohl nach oben als auch nach unten begrenzt, um ein Torsionsspiel der Integrationsglieder während Spannungssprüngen zu verhindern. Die Ausgänge sämtlicher PI-Kompensatoren sind auf Nenndaten begrenzt, damit ein Schutz des Systems gewährleistet ist.

Sowohl die  $i_d$ - als auch die  $i_q$ -Stromregelkreise verstärken den Fehler zwischen den Referenzströmen und den tatsächlichen Strömen und erzeugen die gewünschten Spannungswerte  $u_d$  und  $u_q$ . Ein Vorteil der FOC-Lösung liegt darin, dass sie AC-Statorströme und -spannungen in Quasi-DC-Spannungen und -Ströme im rotorfeldorientierten Koordinatensystem umsetzt. Dies ist eine besonders einfache und effektive Vorgehensweise, da die PI-Stromregler nicht mit Strömen bei Rotorfrequenz in Berührung kommen und sie zur Kompensation des durch den Widerstand und die Induktivität der Wicklung eingeführten Einzelpols lediglich die DC-Anteile von  $i_d$  und  $i_q$  regeln.

Zwar verlässt sich die Rotor-FOC auf Größen, die auf das rotierende dq-Koordinatensystem bezogen sind, doch handelt es sich bei den gemessenen Signalen um die AC-Motorphasenströme  $i_u$ ,  $i_v$  und  $i_w$ . Zur Erfassung der Größen  $i_d$  und  $i_q$  müssen diese in das rotierende dq-Koordinatensystem übersetzt werden:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die AC-Referenzwerte  $u_u$ ,  $u_v$  und  $u_w$  erhält man auf umgekehrte Weise:

$$\begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0,5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0,5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

Folglich benötigt man zur Regelung eines PMSM sowohl Informationen über den Rotorwinkel als auch über die Drehzahl, die normalerweise von externen Bauelementen wie Hall-Sensoren abgeleitet werden. Jedoch kann der Wegfall externer Sensoren Kosteneinsparungen mit sich bringen und die Zuverlässigkeit erhöhen. Ein geberloser Regler errechnet Lage und Drehzahl aus den Motorströmen und Motorspannungen und spart auf diese Weise externe Messfühler ein.

Ein geberloser Rotorwinkelbeobachter, wie er in Bild 2 dargestellt ist, nutzt die Gegen-EMK (Elektromotorische Kraft) der Statorwicklung, die

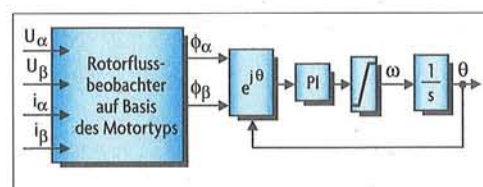


Bild 2. Aufbau des Rotorwinkelbeobachters.

aus dem gemessenen Statorstrom und den angelegten Statorspannungen errechnet wird. Die Integration der Stator-Gegen-EMK ergibt den verkoppelten Rotorfluss, der eine Funktion der Ausrichtung zwischen den Statorwicklungen und dem Rotormagneten ist. Diese wiederum ist eine Sinus- und Cosinus-Funktion des Rotorwinkels. Der Rotorwinkelbeobachter umfasst einen Vektorrotor, der die Abweichung zwischen dem Rotorflusswinkel und dem geschätzten Winkel errechnet. Der Rückführ-Regelkreis auf Basis eines PI-Reglers zwingt den Winkelfehler auf Null, so dass der geschätzte Winkel dem Winkel des Rotorflusses folgt. Die zusätzliche integrierende



Funktion ergibt eine Ableitung der Winkelgeschwindigkeit des Rotors, da der Eingangswert des Integrierglieds der zeitlichen Ableitung des Ausgangs folgt.

Da sich der Rotorwinkelbeobachter auf die Gegen-EMK der Statorwicklung bezieht, muss sich der Rotor in

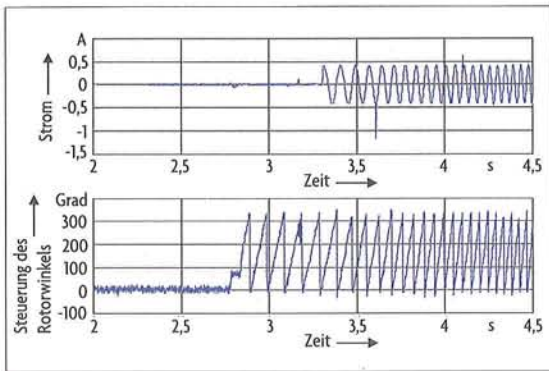


Bild 3. Experimentell ermittelte Signalverläufe von Motorstrom und Rotorwinkel im Vorwärtslauf.

Bewegung befinden, damit Winkel und Position geschätzt werden können. Beim Hochlaufen ist der Winkel unbekannt, und der Controller regelt die Motorfrequenz in einem offenen Regelkreis ohne Positionsrückkopplung hoch. Der Rotormagnet führt eine natürliche Synchronisierung mit dem rotierenden Statorfeld durch, auch wenn er vielleicht nicht optimal abgeglichen ist. Sobald der Motor eine bestimmte Mindestdrehzahl erreicht hat, lässt sich die Gegen-EMK erfassen, der geberlose Regler schaltet auf eine geschlossene Regelung um und betreibt den Motor mit maximalem Wirkungsgrad. Für einen besseren Anlaufvorgang wird eine Park-Funktion eingeführt, die den Rotor vor dem Start in einer bekannten Position arretiert.

### Natürlich rotierende Last

Allerdings kann sich der Rotor in manchen Fällen zu dem Zeitpunkt, zu dem der Regler das Startsignal erhält, bereits durch äußerliche Einflüsse drehen. Ein Beispiel dafür wäre ein Ventilator in einem

im Außenbereich montierten Modul einer Klimaanlage. In dieser Situation kann der Regler nicht von

einer Null-Drehzahl ausgehen, ehe die Anlaufregelung die Motorfrequenz hochfährt. Das Anlegen niederfrequenter Spannungen an einen mit hoher Drehzahl laufenden Motor würde zu hohen Strömen und einem großen pulsierenden Drehmoment führen, die das System potentiell beschädigen könnten. Eine weitere Komplikation besteht darin, dass die natürliche Drehrichtung einer solchen Last sowohl vorwärts als auch rückwärts sein kann.

In jedem Fall stehen dem Regler beim Anlauf nicht die erforderlichen Positionsdaten zur Verfügung, um den Statorstrom korrekt mit dem Rotorfeld abzugleichen und so ein konstantes Drehmoment zu erzeugen. Folglich müssen der Rotorwinkelbeobachter sowie der Regler, wenn man einen sich natürlich drehenden PMSM-Motor ohne Störungen starten will, zunächst einmal zu arbeiten beginnen, ohne dass ein Drehmoment erzeugt wird.

Um dies zu erreichen, beginnt der Regler mit der Referenz für den drehmomenterzeugenden Strom  $I_{qref}$ , der auf Null gestellt ist. Da der magnetflusserzeugende Strom  $I_{dref}$  ebenfalls Null ist, wird der Statorstrom des Motors auf den Wert Null geregelt, und es liegt kein Drehmoment an. In dieser Null-Drehmoment-Referenz-Betriebsart verriegelt sich der Rotorwinkelbeobachter mit der Rotorwinkelposition. Der Winkelrotationsblock im Winkelschätzer hat zwei Ausgänge: Einer ist eine Sinusfunktion der Abweichung zwischen dem geschätzten Winkel und dem Rotorflusswinkel, der andere ist eine Cosinus-Funktion des Winkelfehlers. Sobald sich der Winkelschätzer mit dem Rotorflusswinkel verriegelt, ist der Sinusausgang Null und der Cosinus-Ausgang gleich der Größe des Rotorflusses. Der Regler stellt fest, dass der Schätzer mit dem Rotorfluss verriegelt ist, sobald der Ausgang der Rotorflussgröße einen ausreichend hohen Wert erreicht hat. Je nach beobachteter Richtung und dem Wert der Motor-

drehzahl kann der Regler dann berechnen, ob sich der Rotor vorwärts oder rückwärts dreht, und er kann entsprechende Maßnahmen ergreifen.

### Vorgehensweise bei Vorwärtsrotation

Dreht sich der Rotor auf natürliche Weise in Vorwärtsrichtung, schaltet der Regler die Drehzahlregelung sofort ein, nachdem der Rotorwinkelbeobachter mit dem Rotorwinkel verriegelt ist. Der Drehzahlregler berechnet den Drehmoment-Referenzstrom  $I_{qref}$  und fährt die Drehzahl auf den Sollwert hoch. Um die Möglichkeit abrupter Drehzahlsprünge zu reduzieren, wird der Grenzwert des Referenzstroms  $I_{qref}$  Schritt für Schritt bis zum Nennstrom des Motors erhöht.

In Bild 3 sind die Signalverläufe von Rotorstrom und Rotorwinkel während des Anlaufs in einer vorwärts

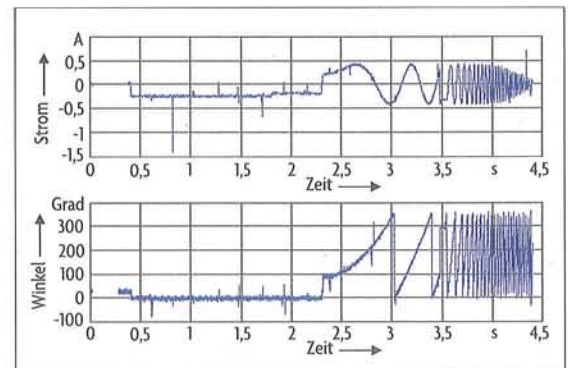


Bild 4. Experimentell ermittelte Signalverläufe von Motorstrom und Rotorwinkel im Rückwärtslauf.

drehenden Last dargestellt, wobei der Rotorwinkelschätzer mit der Rotorposition verriegelt ist. Sobald die Verriegelung festgestellt ist, wird die Begrenzung von  $I_{qref}$  aufgehoben, und das volle Drehmoment wird, wie durch den Drehzahlregelkreis bestimmt, an den Motor angelegt.

In der Praxis soll diese Vorgehensweise nur dann angewendet werden, wenn die beobachtete Drehzahl oberhalb eines Schwellenwerts der Vorwärtsdrehzahl liegt, der bei ungefähr 5 bis 10 % der Motor-Nenn Drehzahl anzusetzen ist. Dies deshalb, weil der Rotorwinkelbeobachter bei sehr niedrigen Drehzahlen, bei denen die Gegen-EMK schwach ist, nicht genau genug arbeitet.





## ▣ Vorgehensweise bei Rückwärtsdrehung

Bewegt sich der Motor gemäß der beobachteten Drehzahl in umgekehrter Richtung, muss der Regler den Motor erst abbremsen, ehe er von Drehzahl Null in die richtige Richtung starten kann. Wird festgestellt, dass der Motor stillsteht, kann auf die Bremsstufe verzichtet werden. Bild 4 zeigt experimentell ermittelte Signalverläufe des Starts bei einem rückwärts drehenden Ventilator. Die erste Stufe ist der anfängliche Bremszeitraum. Als nächstes folgt eine Park-Funktion von zwei Sekunden Dauer. Dann ist ein offener geregelter Hochlauf der Drehzahl erkennbar, der ungefähr eine Sekunde dauert, und als letztes schließt der Regler die Positions- und Drehzahlkreise, und der Motor beschleunigt hoch bis zur Solldrehzahl.

## ▣ Anlaufvorgang in Hardware gegossen

International Rectifier hat dieses Verfahren zum Starten natürlich drehender PMSM in einer Familie von Regler-ICs implementiert, die speziell für ventilatorbasierte Applikationen entwickelt wurden. Als Mitglieder der „iMotion“-Produktfamilie gießen diese ICs das Rotor-FOC-Prinzip von Bild 1 in konfigurierbare Hardware, die so genannte „Motion Control Engine“ (MCE). Die MCE umfasst sämtliche Reglerblöcke, die erforderlich sind, um eine sinusförmige geberlose FOC für Haushaltsgeräte umzusetzen.

Wegen der technologischen Umsetzung dieser Funktionsblöcke in Hardware erreicht die MCE eine beträchtlich höhere Regelbandbreite bei Drehmoment und Drehzahl als eine herkömmliche, auf einem Standard-DSP basierende Regelung. Und zwar hauptsächlich deshalb, weil jeder Funktionsblock spezielle Hardware enthält, was zu einer sehr hohen Parallelität der Rechenvorgänge sowie zu einer optimalen Implementierung führt. Die Siliziumfläche ist minimiert, da dieselbe Bibliotheksfunktion im Algorithmus des Motors mehrfach genutzt wird. So wird etwa ein PI-Kompensator in der geberlosen FOC mehr als zweimal benötigt sowie ein weiteres

mal im Drehzahlregelkreis. Darüber hinaus wird auch der Vektorrotor öfter als zweimal genutzt. Zu den weiteren Funktionen zählen die „Clark-Transformation“, ein Begrenzer, eine lineare Hochlauffunktion sowie ein Tiefpassfilter. In einem Standard-DSP erfolgen alle Berechnungen sequenziell, wohingegen sie in Hardware schneller, weil parallel durchgeführt werden.

Über diese anwendungsspezifische Hardware für die Motorregelung hinaus sind im Klimaanlagen-Regler-IC sowohl ein 8-bit-Mikrocontroller des Typs 8051 zur Durchführung nichtzeitkritischer Aufgaben als auch die erforderliche Motoransteuerungsperipherie integriert. Eng mit der MCE gekoppelt sind diese in der Lage, den Dreiphasen-Motorstrom auf Grundlage des Signals von einem einzelnen Nebenschlusswiderstand im DC-Zwischenkreisbus zu rekonstruieren. Dies vereinfacht den Aufwand zur Strommessung durch eine Senkung der Anzahl extern benötigter Fühlerwiderstände. gs

## Literatur

- [1] Motoransteuerungs-ICs von International Rectifier:  
[www.irf.com/product-info/imotion/](http://www.irf.com/product-info/imotion/)



**Dr. Aengus Murray**

studierte Electrical Engineering am University College Dublin und schloss dort 1980 mit dem Grad B.E. ab. Vier Jahre später promovierte er dort über Motorsteuerungen. Zunächst arbeitete er für Kollmorgen Industrial Drives in Irland und lehrte an der Dublin City University Leistungselektronik. Anschließend wechselte er für elf Jahre zu Analog Devices nach Boston, wo er das Entwicklungsteam für Motorregelungen leitete. Seit Anfang 2005 ist er Direktor des iMOTION-Produkt-Managements der „Energy Saving Products Division“ bei International Rectifier im kalifornischen El Segundo.  
[amurray1@if.com](mailto:amurray1@if.com)