Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 98 (2007)
Heft: 5

Artikel: Neuartiger kompakter Resolver mit reduzierten Kosten
Autor: Fräger, Carsten
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857419

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neuartiger kompakter Resolver mit reduzierten Kosten

Kaskadenresolver als attraktiver Drehzahl- und Winkelsensor für elektrische Antriebe

Resolver finden breiteste Anwendung zur Drehzahl- und Lageerfassung in elektrischen Antrieben. Sie stellen ein kostengünstiges und robustes Messglied für rotierende Antriebe dar. Heute bestehen sie aus zwei Aktivteilen: einem Ringtransformator und einem geblechten Teil mit zweisträngiger Statorwicklung. Durch eine neue Wicklungsanordnung lässt sich der Ringtransformator eliminieren. Dies führt zu einer Kostensenkung, einem einfachen mechanischen Aufbau und einer kürzeren Bauweise. Messungen an einem ausgeführten Resolver zeigen die Funktionsfähigkeit der neuen Anordnung.

Viele elektrische Antriebe werden drehzahl- oder winkelgeregelt betrieben. Typische Anwendungen sind beispielsweise Positionierantriebe, die eine Zielposition anfahren und auch unter Last

Carsten Fräger

halten sollen, oder Antriebe, die eine vorgegebene Drehzahl exakt auch bei Belastung einhalten sollen.

Für diese Aufgabe werden Frequenzumrichter eingesetzt, die den Elektromotor – z.B. einen Synchron- oder Asynchronmotor – mit variabler Spannung und Frequenz versorgen. Die Steuerung des Frequenzumrichters erfolgt durch einen Regler, der neben dem Motorstrom auch Drehzahl und Drehwinkel des Motors entsprechend den Sollwerten regelt. Für Synchronmotoren wird der Drehwinkel des Rotors zur korrekten Stromvorgabe benötigt. Zur Drehzahl- und Winkelregelung ist der aktuelle Drehwinkel des Rotors erforderlich. Zur Messung der Ist-Drehzahl und des Ist-Winkels des Motors werden unter anderem Resolver eingesetzt.

Resolver sind elektromechanische Winkelmessgeräte ohne elektronische Bauteile. Sie werden von einer im Frequenzumrichter befindlichen elektronischen Schaltung versorgt und ausgewertet. Dadurch sind sie im Vergleich zu anderen Messgeräten wie etwa Inkrementalgebern mit optoelektronischer Auswertung äusserst robust: Resolver ertragen extreme Temperaturen und Vibrationen und sind sowohl gegen Spannungsstörungen als auch gegen radioaktive Strahlung resistent. Die empfindliche Elektronik ist geschützt im Schaltschrank untergebracht und kommt mit den Umwelteinflüssen nicht in Kontakt. Bild 1 zeigt einen Servoumrichter mit integrierter Resolverauswertung.

In Bild 2 ist ein Servomotor mit eingebautem Resolver abgebildet. Resolver liefern innerhalb von zwei Polen den absoluten Winkel. Das bedeutet, dass ein 2-poliger Resolver direkt eine Umdrehung auflösen kann. Ein 6-poliger Resolver kann $^1/_3$ einer Umdrehung direkt auflösen, jedoch liefert er keine Information darüber, in welchem Drittel sich der Rotor befindet. Aus der Winkeländerung wird die Drehzahl ermittelt.

Beim Betrieb mit Synchronmotoren liefern die Resolver den besonderen Vorteil, dass sie innerhalb von zwei Polen den Winkel absolut und nicht nur inkrementell liefern. Dadurch ist eine Strom-

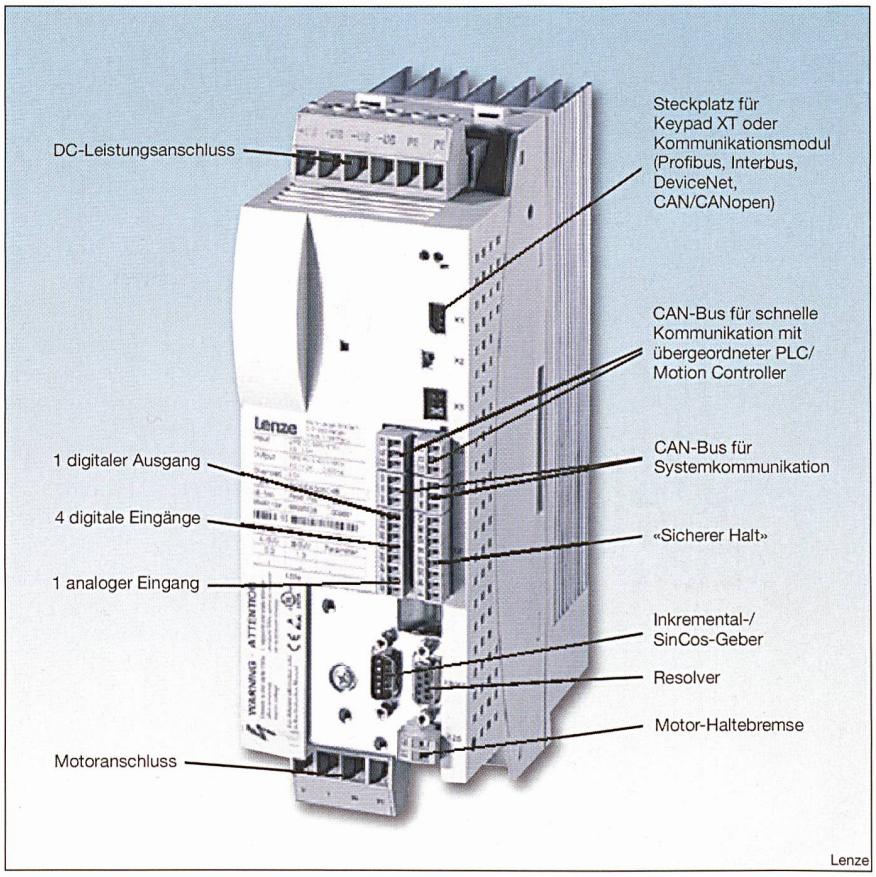


Bild 1 Servogerät mit Auswerteelektronik für Resolver

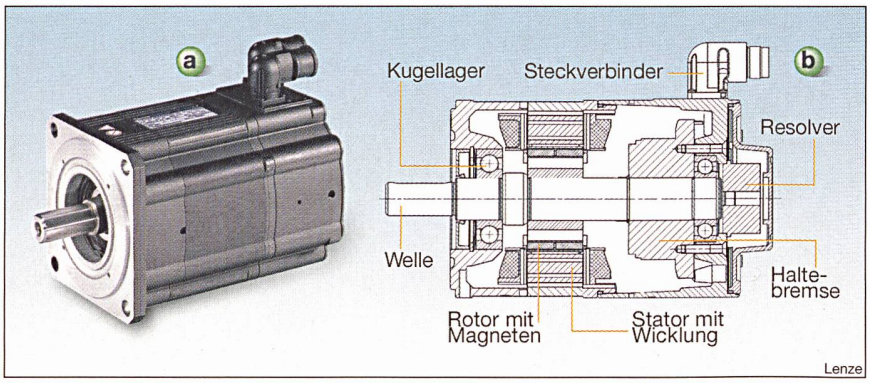


Bild 2 Synchronservomotor mit Resolver
Bild 2a: Seitenansicht; Bild 2b: Schematischer Längsschnitt

vorgabe passend zum Dauermagnetfeld des Rotors sofort nach Einschalten des Antriebs gegeben. Aufwendige Referenzfahrten oder zusätzliche Massnahmen zur absoluten Winkelmessung entfallen. Einzige Voraussetzung ist, dass die Polpaarzahl p_{motor} des Motors ein ganzzahliges Vielfaches der Resolverpolpaarzahl p ist. Dies macht Resolver zu attraktiven Drehzahl- und Winkelmessgeräten für elektrische Antriebe.

Im Folgenden wird gezeigt, wie durch eine besondere Ausführung des Resolvers die Kosten und das Bauvolumen weiter verringert werden können. Dazu wird das Prinzip der Kaskadenmaschine eingesetzt [1, 2].

Resolver in normaler Ausführung

Ein Resolver besteht normalerweise aus einem Ringtransformator und dem eigentlichen Resolverteil mit einer einsträngigen Rotorwicklung und einer zweisträngigen Statorwicklung der Polpaarzahl p, die üblicherweise als Speed p bezeichnet wird (Bild 3).

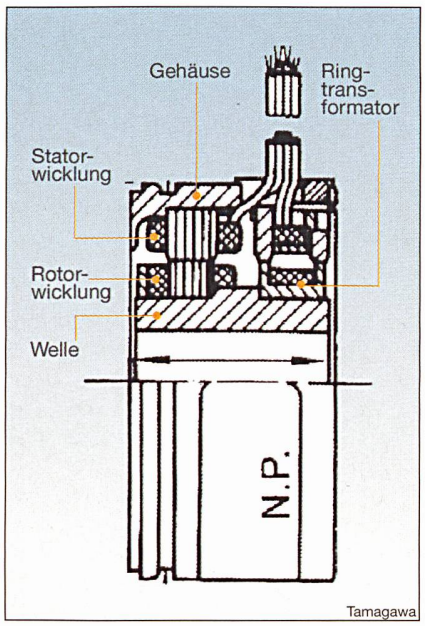


Bild 3 Schnittbild Resolver in normaler Ausführung

Mithilfe des Ringtransformators wird in den einsträngigen Läufer eine Trägerfrequenzspannung U_e übertragen (Bild 4).

Die Trägerfrequenzspannung induziert in den beiden Strängen der Statorwicklung die Spannungen U_{cos} und U_{sin}. Da die beiden Stränge elektrisch um 90° versetzt sind, sind die Spannungen cosinusförmig bzw. sinusförmig vom Drehwinkel abhängig:

$$U_{cos} = U_e \cdot \ddot{u}_{tr} \cdot \ddot{u}_{rs} \cdot \cos(p \cdot \varphi)$$
$$U_{sin} = U_e \cdot \ddot{u}_{tr} \cdot \ddot{u}_{rs} \cdot \sin(p \cdot \varphi)$$

Aus dem Verhältnis der Spannungen lässt sich der Drehwinkel bestimmen:

$$\varphi_{mess} = \frac{1}{p} \cdot \arctan\left(\frac{U_{sin}}{U_{cos}}\right) \qquad (1)$$

Der gemessene Winkel φ_{mess} weicht aufgrund von Messungenauigkeiten vom tatsächlichen Winkel φ ab.

Zur Durchführung der Rechnung in der Auswertelektronik existieren verschiedene Verfahren. Beispielsweise kann eine arctan-Tabelle verwendet werden oder es kommt ein Nachlaufregler zum Einsatz, der den Winkel φ_{mess} dadurch bestimmt, dass die Spannungen U_{cos} und U_{sin} mit den Werten einer Sinus- bzw. Cosinus-Tabelle verglichen werden. Der Winkel ist dann gefunden, wenn die Abweichungen mit den Tabellenwerten am geringsten sind.

Die Spannungen U_{cos} und U_{sin} werden durch synchrone Gleichrichtung bzw. Abtastung der Trägerfrequenzsignale gewonnen. Hier ist besonders auf eingekoppelte Störungen mit Trägerfrequenz zu achten.

Die oben beschriebene Winkelabhängigkeit der Spannungen lässt sich auch durch ein komplexes Übersetzungsverhältnis $\underline{\ddot{U}}$ beschreiben:

$$\ddot{u}_{cos} = \frac{U_{cos}}{U_e} = \ddot{u}_{tr} \cdot \ddot{u}_{rs} \cdot \cos(p \cdot \varphi) = \ddot{u} \cdot \cos(p \cdot \varphi)$$
$$\ddot{u}_{sin} = \frac{U_{sin}}{U_e} = \ddot{u}_{tr} \cdot \ddot{u}_{rs} \cdot \sin(p \cdot \varphi) = \ddot{u} \cdot \sin(p \cdot \varphi) \qquad (2)$$
$$\underline{\ddot{U}} = \ddot{u}_{cos} + j \cdot \ddot{u}_{sin} = \ddot{u} \cdot e^{j \cdot p \cdot \varphi}$$

Daraus folgt:

$$\varphi_{mess} = \frac{1}{p} \cdot \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}[\underline{\ddot{U}}]}{\mathrm{Re}[\underline{\ddot{U}}]}\right)$$

Fehlereinflüsse auf die Winkel- und Drehzahlmessung

Bei der realen Bestimmung des Winkels aus den Spannungen treten Fehler auf, da das Übersetzungsverhältnis des Resolvers nicht ideal sinusförmig verläuft. Ursachen sind unter anderem:

- Oberfelder im Resolver.
- Exzentrizität des Rotors gegenüber dem Stator.
- Unsymmetrie in den beiden Strängen des Stators.
- Unsymmetrien in der Auswerteelektronik und in der Leitung zum Resolver.
- Störeinkopplungen auf die Spannungsmessung.

Daher ist bei Resolvern für eine genaue Winkelmessung der Einsatz von oberfeldarmen Wicklungen erforderlich. Die Lagerung muss genau erfolgen, sodass Exzentrizitäten klein gehalten werden. Unsymmetrien in der Auswerteelektronik, der Leitungsführung und der Statorwicklung müssen vermieden werden. Störeinkopplungen werden durch geschirmte Leitungen und eine Schirmung gegenüber der Motorwicklung vermie-

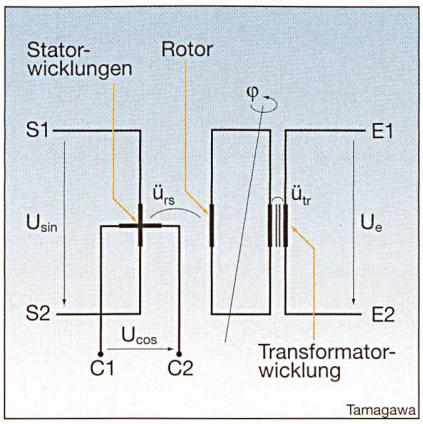


Bild 4 Schaltung Resolver in normaler Ausführung

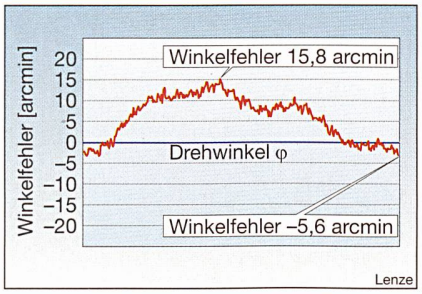


Bild 5 Fehlerkurve eines Resolvers

den. Bild 5 zeigt die Winkelfehlerkurve eines Resolvers.

Resolver aus zwei in Kaskade geschalteten Teilen

Die Übertragung der Trägerfrequenzspannung vom Stator zum Rotor geschieht bei einem üblichen Resolver durch einen Ringtransformator mit winkelunabhängigem Übersetzungsverhältnis. Alternativ kann die Übertragung durch einen Resolverteil mit winkelabhängiger Übersetzung erfolgen. Dies ist in Bild 6 der Resolverteil 1 (links) mit einsträngiger Statorwicklung und mehrsträngiger Rotorwicklung. Die Rotorwicklung 1 ist mit der Rotorwicklung 2 verbunden. An der zweisträngigen Statorwicklung 2 lassen sich die winkelabhängigen Spannungen U_{cos} und U_{sin} abgreifen. Das komplexe Übersetzungsverhältnis $\underline{Ü}$ der Kaskadenschaltung ergibt sich folgendermassen:

$$\underline{Ü} = \underline{Ü}_1 \cdot \underline{Ü}_2 = ü_1 \cdot e^{j \cdot p_1 \cdot \varphi} \cdot ü_2 \cdot e^{-j \cdot p_2 \cdot \varphi} = ü_1 \cdot ü_2 \cdot e^{j \cdot (p_1 - p_2) \cdot \varphi} \quad (3)$$

Entsprechend lässt sich aus den Spannungen der Winkel bestimmen:

$$\varphi_{mess} = \frac{1}{p_1 - p_2} \cdot \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}[\underline{Ü}]}{\mathrm{Re}[\underline{Ü}]}\right) = \frac{1}{p_1 - p_2} \cdot \arctan\left(\frac{U_{sin}}{U_{cos}}\right) \quad (4)$$

Damit verhält sich die Kaskadenschaltung identisch zu der normalen Resolverausführung. Die Kaskadenschaltung zweier Resolverteile ist natürlich komplizierter als die normale Resolverausführung mit Transformator, jedoch lassen sich die beiden Teile zu einem einzigen Teil vereinigen.

Kaskadenresolver

Sind die Nutzahlen der beiden in Kaskade geschalteten Resolverteile gleich und die Polpaarzahlen unterschiedlich, $|p_1| \neq |p_2|$, so lassen sich beide Teile zu einem Kaskadenresolver vereinigen. Die Wicklungen werden dann in einem gemeinsamen Blechpaket untergebracht (Bild 7). Die zugehörige Schaltung ist in Bild 8 dargestellt.

Die Vorteile dieses Kaskadenresolvers sind:

- Erhebliche Reduktion der Anzahl der Bauteile gegenüber heutigen Resolvern.
- Teure Materialien für den Ringtransformator entfallen, was zu einer Kostenreduktion um etwa 30% führt.
- Einfachere Gestaltung von Welle und Gehäuse, ggf. gehäuse- und wellenlose Ausführung.
- Um etwa 50% reduzierte Baulänge.

Mit den Polpaarzahlen der beiden Grundfelder p_1 und p_2 ist die resultierende Polpaarzahl p (Speed p) des Kaskadenresolvers festgelegt: $p = p_1 - p_2$.

Um eine bestimmte Polpaarzahl p des Kaskadenresolvers zu verwirklichen, können unterschiedliche Polpaarzahlkombinationen p_1, p_2 verwendet werden. Dabei sind sowohl positive als auch negative Polpaarzahlen möglich. Positive und negative Polpaarzahlen bedeuten positiven bzw. negativen Drehsinn des zugehörigen Magnetfeldes im Luftspalt des Resolvers.

Bei der Auswahl der Polpaarzahlen sind verschiedene Gesichtspunkte zu beachten:

- Zu den beiden Polpaarzahlen p_1 und p_2 müssen Ständerwicklungen existieren, die elektromagnetisch entkoppelt sind, also keine gemeinsamen Feldpolpaarzahlen besitzen.
- Die Ständerwicklungen müssen die gleiche Nutzahl besitzen.

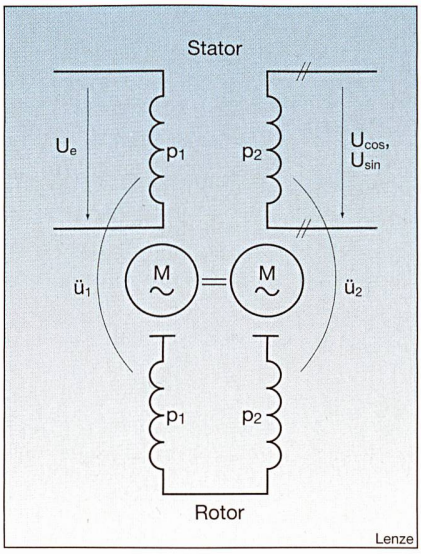


Bild 6 Resolver aus der Kaskadenschaltung zweier Teile

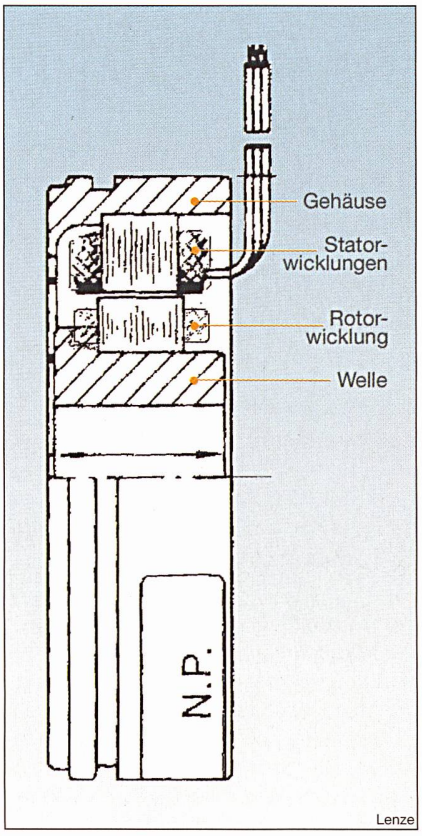


Bild 7 Schnittbild Kaskadenresolver

- Durch Montageungenauigkeiten darf nur eine geringe Beeinflussung der magnetischen Kopplung erfolgen.
- Die einzelnen Polpaarzahlen sollen möglichst niedrig sein.

In der Praxis ergeben sich folgende sinnvolle Kombinationen für 6-polige Synchron- und Asynchronmotoren: $p_1 = 1$, $p_2 = -2$ oder $p_1 = 2$, $p_2 = -1$ und somit $p = 3$. Für 8-polige Synchronmotoren ergeben sich die entsprechenden Kombinationen: $p_1 = 1$, $p_2 = -3$ oder $p_1 = 3$, $p_2 = -1$ und somit $p = 4$.

Die Läuferwicklung des Kaskadenresolvers hat einzig die Aufgabe, die beiden verschiedenen Felder der Polpaarzahlen p_1 und p_2 der Ständerwicklung miteinander zu koppeln. Die Wicklung muss eine Verkopplung der beiden Felder genauso bewirken, wie es getrennte Läuferwicklungen tun. Sie braucht dazu weder eine bestimmte Strangzahl zu besitzen, noch sind die absoluten Werte der in ihr induzierten Spannungen von Interesse. Sie ist in sich geschlossen und ähnelt damit einer Käfigwicklung.

Die Aufgabe der Läuferwicklung, die beiden Ständerwicklungen mit den Polpaarzahlen p_1 und p_2 miteinander zu koppeln, bedeutet, dass in der Läuferwicklung fliessende Ströme gleichzeitig ein Feld der Polpaarzahl p_1 und ein Feld der

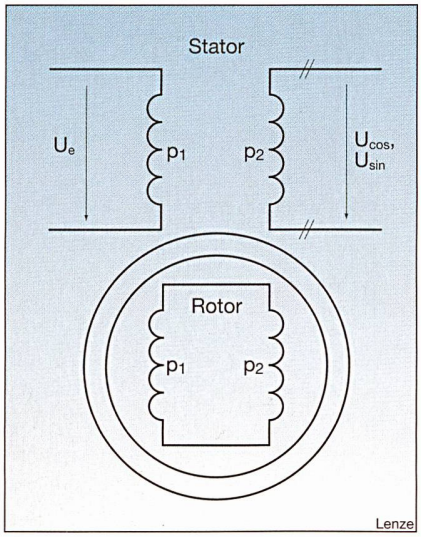


Bild 8 Schaltung Kaskadenresolver

Polpaarzahl p_2 erzeugen. Dann können in der Läuferwicklung sowohl die Ständerwicklung mit der Polpaarzahl p_1 als auch die Ständerwicklung mit der Polpaarzahl p_2 im Läufer die gleichen Ströme induzieren. Das heisst, dass die beiden Ständerwicklungen durch die Läuferströme miteinander gekoppelt sind.

Die Läuferwicklung muss also so gestaltet sein, dass in ihr fliessende Ströme eine Felderregerkurve nach sich ziehen, die die beiden Polpaarzahlen p_1 und p_2 enthält. Die komplexe Felderregerkurve $\underline{v}$ mit diesen Polpaarzahlen zieht jeweils Drehfelder mit der Läuferkreisfrequenz ω_r nach sich.

$$\begin{aligned}\underline{v} &= \hat{V}_1 \cdot e^{j(\omega_r \cdot t - p_1 \cdot x_r)} + \hat{V}_2 \cdot e^{j(\omega_r \cdot t - p_2 \cdot x_r)} \\ &= \underline{v}_{1,2} \cdot e^{j \cdot \omega_r \cdot t} \qquad (5) \\ \text{mit } \underline{v}_{1,2} &= \hat{V}_1 \cdot e^{-j \cdot p_1 \cdot x_r} + \hat{V}_2 \cdot e^{-j \cdot p_2 \cdot x_r}\end{aligned}$$

Für die Anteile bzw. die resultierende Felderregerkurve gilt in reeller Schreibweise:

$$\begin{aligned}v_1 &= \hat{V}_1 \cdot \cos(\omega_r \cdot t - p_1 \cdot x_r) \\ &= \mathrm{Re}\left\{ \hat{V}_1 \cdot e^{j(\omega_r \cdot t - p_1 \cdot x_r)} \right\} \\ v_2 &= \hat{V}_2 \cdot \cos(\omega_r \cdot t - p_2 \cdot x_r) \qquad (6) \\ &= \mathrm{Re}\left\{ \hat{V}_2 \cdot e^{j(\omega_r \cdot t - p_2 \cdot x_r)} \right\} \\ v &= v_1 + v_2 = \hat{V}_1 \cdot \cos(\omega_r \cdot t - p_1 \cdot x_r) \\ &\quad + \hat{V}_2 \cdot \cos(\omega_r \cdot t - p_2 \cdot x_r)\end{aligned}$$

Bild 9 zeigt die Ortskurven der komplexen Felderregerkurven $\underline{v}_{1,2}$ für verschiedene Polpaarzahlen. Die Kreuze × kennzeichnen Umfangswinkel im Abstand von 10°. Es handelt sich um bizirkulare Quartiken.

Charakteristisch für alle Polpaarzahlkombinationen ist der keulenförmige Verlauf der Ortskurve mit ausgeprägten Minima und Maxima des Betrags mit unterschiedlichen Phasenlagen der Felderregung.

Damit solch eine Felderregerkurve entstehen kann, ist eine ungleichmässige Stromverteilung und damit eine ungleichmässige Leiterverteilung der Läuferwicklung erforderlich. Im Extremfall bleiben einige Nuten des Läufers unbewickelt. Für den Läufer kommen damit bezüglich der Grundpolpaarzahlen nur unsymmetrische Wicklungen infrage.

Die Kaskadenschaltung zweier Resolver kann also innerhalb eines Aktivteils mit einer Läuferwicklung verwirklicht werden, wenn eine Wicklung kreiert wird, die die oben dargestellten Eigenschaften hat.

Funktionsmuster Kaskadenresolver

Zur Überprüfung der theoretischen Überlegungen wurde ein Funktionsmuster mit den Polpaarzahlen $p_2 = 2$ und $p_2 = -1$ ($p = 3$) aufgebaut.

Wie oben erwähnt, erhalten Resolver in der Regel sehr oberfeldarme Wicklungen, um eine genaue Winkelbestimmung aus den induzierten Spannungen zu ermöglichen. Für ein erstes Funktionsmuster wurden jedoch im Gegensatz dazu sehr einfache Wicklungen im Stator und Rotor verwendet (Bild 10).

Infolge der einfachen Wicklungen ist die Winkelfehlerkurve mit einem Fehler von ±33 Winkelminuten relativ schlecht (Bild 11). Durch die Verwendung oberfeldarmer Statorwicklungen lassen sich die Fehler jedoch stark vermindern, sodass hier ein Weg zur Reduzierung der Kosten bei Resolvern gefunden ist.

Zusammenfassung

Bei dem hier vorgestellten Kaskadenresolver werden gegenüber Resolvern normaler Ausführung die Zahl der Bauteile und die Baugrösse verringert. Dieses geschieht dadurch, dass der Ringtransformator entfällt. Das Statorblechpaket des Kaskadenresolvers erhält dazu eine zweisträngige und eine einsträngige Wicklung mit verschiedenen Polpaarzahlen. Im Rotor kommt eine spezielle Wicklung zur winkelabhängigen Kopplung der Statorwicklungen zum Einsatz.

Messungen an einem Funktionsmuster belegen die Funktionsfähigkeit des Kaskadenresolvers.

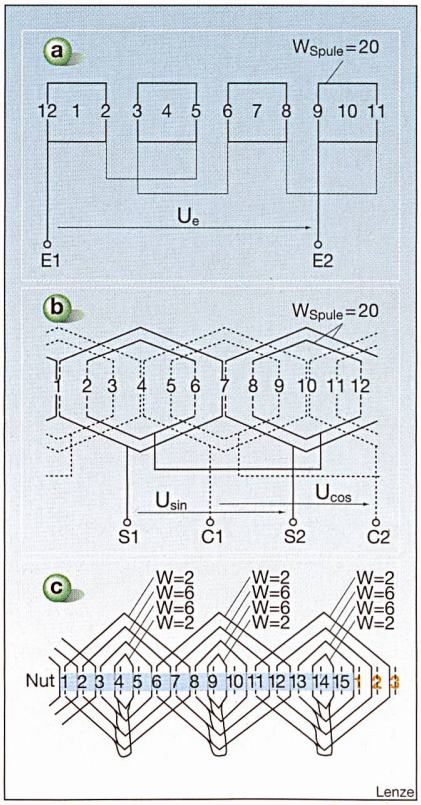


Bild 10 Funktionsmuster

Bild 10a: Einsträngige Statorwicklung 1 des Funktionsmusters (2p = 4, Oberlage)
Bild 10b: Zweisträngige Statorwicklung 2 des Funktionsmusters (2p = 1, Unterlage, Nuten 1, 4, 7 und 10 auch Oberlage)
Bild 10c: Rotorwicklung des Funktionsmusters

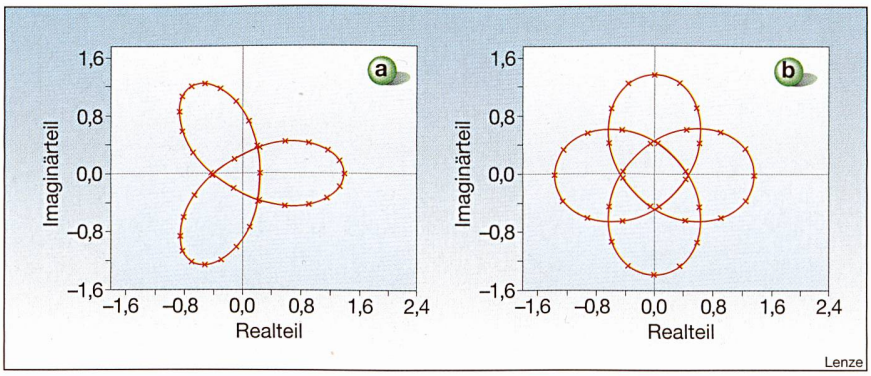


Bild 9 Ortskurven der Felderregerkurve

Bild 9a: $p_1 = 1$, $p_2 = -2$, $p = 3$; Bild 9b: $p_1 = 1$, $p_2 = -3$, $p = 4$

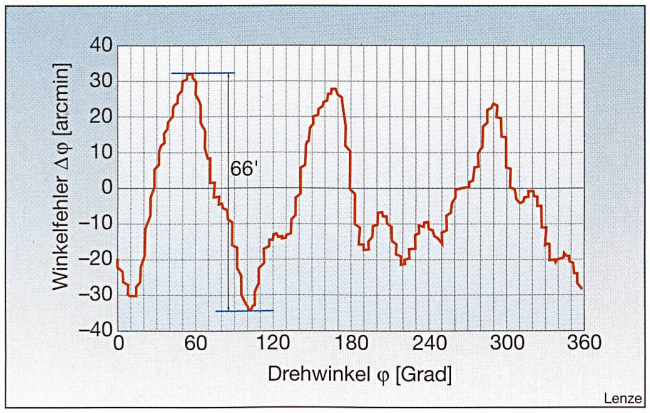


Bild 11 Winkelfehlerkurve des Funktionsmusters

Die Vorteile des Kaskadenresolvers (weniger Bauteile, Wegfall teurer Materialien, einfachere Bauteilgestaltung, reduzierte Baulänge) machen den Kaskadenresolver zu einem attraktiven Drehzahl- und Winkelsensor für elektrische Antriebe mit Synchron- oder Asynchronmotoren.

Besonders bei kleinen Antrieben ist durch den Kaskadenresolver eine deutliche Kostensenkung gegenüber heutigen Lösungen möglich.

Referenzen

[1] C. Fräger: Neuartige Kaskadenmaschine für bürstenlose Drehzahlstellantriebe mit geringem Stromrichteraufwand. VDI-Verlag 1995, Fortschrittberichte Reihe 21, Nr. 189, ISBN 3-18-318921-6.

[2] C. Fräger: Wicklung für den Läufer elektrischer Maschinen zur Kopplung zweier Felder verschiedener Polzahl. Patentschrift DE19526440C2.

[3] E. Tüxen: Das Oberwellenverhalten mehrphasiger Wechselstromwicklungen. Jahrbuch der AEG-Forschung 8 (1941), Seiten 78–105.

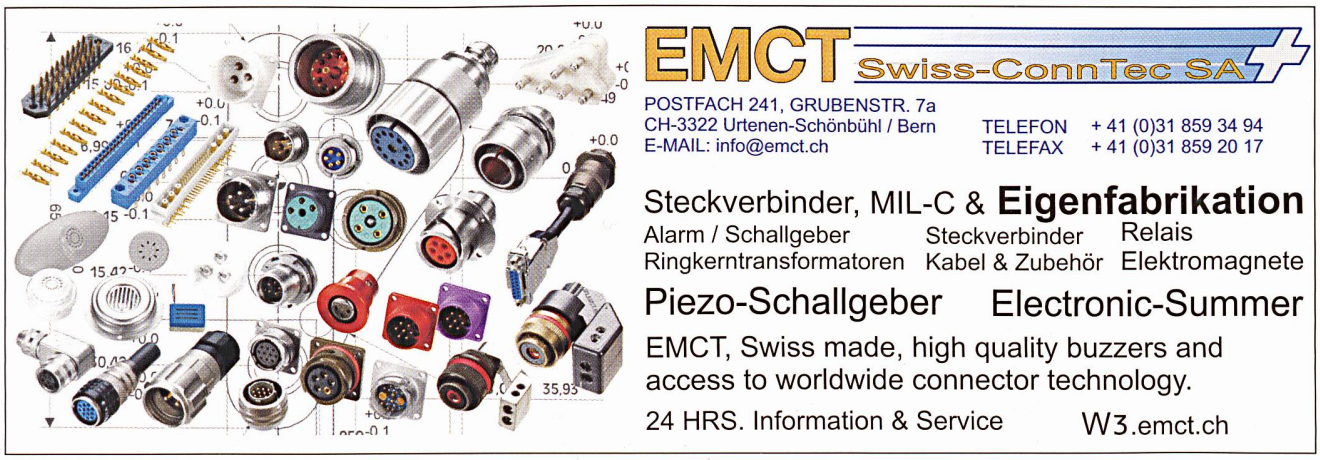
[4] F. Heiles: Gegenseitige Beeinflussung von Wicklungen verschiedener Polzahl. ETZ-A 92 (1971), Heft 9, Seiten 528–533.

Angaben zum Autor

Dr.-Ing. ***Carsten Fräger*** ist Leiter Product Management Servotechnik bei Lenze Drive Systems. Er studierte an der Universität Hannover Elektrotechnik. Seit 1989 ist er bei Lenze tätig, Stationen waren die Applikation Servoantriebe, die Motorenentwicklung und die strategische Entwicklung Elektromechanik. 1994 promovierte er an der Universität Hannover zum Thema «Kaskadenmaschine für Antriebe mit geringem Stromrichteraufwand». An der FVA ist er in den Arbeitskreisen Lineartechnik und Direktantriebe tätig.

Lenze, D-31763 Hameln, fraeger@lenze.de

Résumé

Nouveau capteur angulaire compact à coûts réduits

Un capteur angulaire en cascade: un palpeur intéressant de vitesse de rotation et d'angle pour entraînements électriques. Les capteurs angulaires sont très employés dans la saisie de la vitesse de rotation et de la position des entraînements électriques. Ils représentent un élément de mesure économique et robuste pour les entraînements rotatifs. Actuellement, ils se composent de deux parties actives: un transformateur toroïdal et une partie à tôles à double enroulement stator. Une nouvelle disposition des enroulements permet d'éliminer le transformateur toroïdal. Ceci permet une réduction des coûts, une construction mécanique simplifiée et une longueur réduite. Les mesures effectuées sur un capteur angulaire réalisé prouvent le bon fonctionnement de la nouvelle disposition.