

LEISTUNGSOPTIMIERTE POSITIONSREGELUNG FÜR ELEKTROMECHANISCHE RUDERSTELLANTRIEBE IN FLUGFÜHRUNGSSYSTEMEN

B. Frenzel, F. Kilger
LFK-Lenkflugkörpersysteme GmbH
DaimlerChrysler Aerospace GmbH
Postfach 1661
85705 Unterschleißheim

ÜBERSICHT

Flugführungssysteme in modernen Fluggeräten aller Art werden in zunehmendem Maße mit Fly-by-wire-Steuerung ausgestattet [6][7]. Die Vorteile sind beispielsweise die vereinfachte Fehlerdiagnose und das verringerte Gewicht und Volumen. Für das Ruderstellsystem als integraler Bestandteil des Flugführungssystems erwachsen daraus neue Anforderungen hinsichtlich Umweltbelastung, Leistung und Signalverarbeitung. In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Umsetzung eines derartigen Ruderstellantriebes vorgestellt. Als Beispiel wird ein realisierter Demonstrator eines Ruderstellsystems eines Luft-Luft-Lenkflugkörpers mittlerer Reichweite mit elektromechanischer Ruderankopplung gezeigt.

1 EINLEITUNG

In neuartigen Flugführungssystemen mit Fly-by-wire-Steuerung werden die Aufgaben zur Positionsstellung der integralen Bestandteile Ruder und Ruderstellsystem in zunehmendem Maße dezentralisiert. Aus dieser Dezentralisierung folgt die Forderung nach zunehmendem Einsatz intelligenter Stellantriebe.

Neben dieser vermehrten Verwendung von Smart Actuator Systemen ist ebenso ein Trend in Richtung elektromechanischer Stellantriebe zu erkennen, da bei dieser Art von Stellantrieben auf die Hydraulikversorgung verzichtet werden kann („More Electric Aircraft“). Das bisherige Problem dieser Systeme ist die geringe Leistungsdichte im

Vergleich zu hydraulischen Stellsystemen.

Das Ziel dieses Beitrages ist es daher, ein Verfahren zum Entwurf leistungsoptimierter und ausschließlich elektromechanischer Stellantriebe anzugeben und diese anhand eines Demonstrators zu verifizieren.

Die aus diesem Demonstrator abgeleiteten Ruderstellsysteme werden zunächst ihren Einsatz bei zukünftigen Ruderstelleinheiten für Lenkflugkörper finden. Inwieweit das vorgestellte Konzept auf die in Flugzeugen verwendeten Stellsysteme zu übertragen ist, bleibt zu untersuchen. In einem ersten Schritt ist ein Einsatz im Bereich der sekundären Flugsteuerung denkbar.

Das Blockschaltbild eines intelligenten Ruderstellantriebs für Lenkflugkörper ist in BILD 1 dargestellt. Der Flight Control Computer (FCC) verschickt hierbei zur Einstellung des Ruderwinkels in Abhängigkeit des aktuellen Flugzustandes des Fluggerätes über ein BUS-System den geforderten Ruderwinkel oder die gewünschte Ruderdrehrate an die einzelnen Ruder. Die Signalelektronik der Ruderstellsysteme liefert nach Auswertung des Kommandos die aktuellen Ruderwinkel-/drehraten sowie eventuelle Fehlerinformationen an den FCC zurück. Die Signalelektronik übernimmt außerdem die digitale Lageregelung des Ruders, die Auswertung von Meßgrößen, die Durchführung von Selbsttests sowie die Ansteuerung der Stelleinrichtung/Leistungselektronik eines elektromechanischen Aktuators.

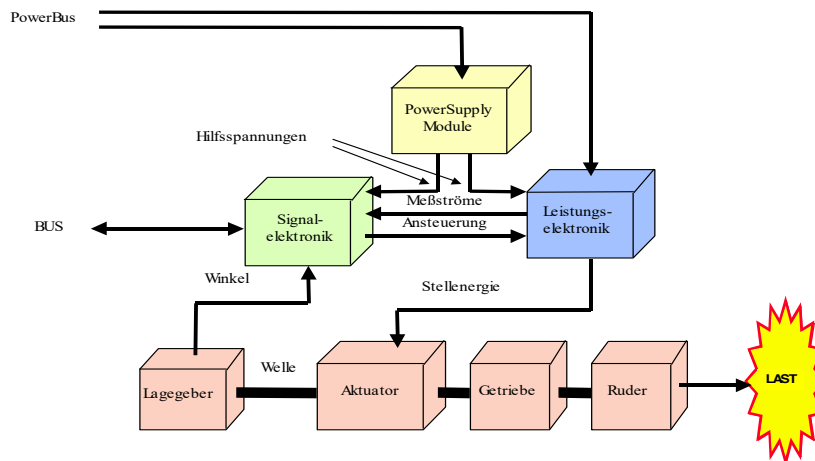


BILD 1: Blockschaftbild eines Ruderstellsystems mit Fly-by-wire-Steuerung

Wesentliche Komponenten sind weiterhin das Power-Supply Module zur Bereitstellung interner Hilfsspannungen, ein mit der Motorwelle starr gekoppelter Lagegeber zur absoluten Lagebestimmung sowie ein Getriebe.

2 AUSLEGUNG

2.1 Anforderungen

Zur Auswahl der Komponenten in BILD 1 sind unterschiedliche Anforderungen zu berücksichtigen:

- Hohe Zuverlässigkeit
- Selbsttestfunktionalität
- Geringe Entwicklungs-/Produktionskosten
- Einfache Adaption
- Geringer Wartungsaufwand
- Geringes Gewicht und Volumen
- Hohe Leistungsdichte

Die Gewichtung der einzelnen Vorgaben werden je nach Einsatzfall variieren. Daher ist eine Architektur zu finden, die möglichst viele der zum Teil gegensätzlichen Anforderungen erfüllt, ohne einzelne Vorgaben völlig zu vernachlässigen.

2.2 Systemkonzeption

Bei der Systemkonzeption des Ruderstellsystems sind die äußeren Vorgaben des Gesamtsystems wie etwa die Definition des Flugkörperbus oder auch die des Power-Bus zu berücksichtigen.

Intern ist das Ruderstellsystem so zu konzeptionieren, daß alle internen Funktionen wie Abarbeitung der Regelalgorithmen, Meßwerterfassung und Stellsignalaufbereitung streng synchron erfolgt. Da Ruderstellsysteme sicherheitskritische Subsystemkomponenten sind, erfolgt die Synchronisation zu einer in einem programmierbaren Logikbaustein realisierten Zeitbasis. Aus dieser leitet sich der einzige, nicht maskierbare Interrupt für den Prozessor der Signalelektronik ab. Weitere Interrupts sind nicht zulässig. Somit ist die Abarbeitung der Algorithmen streng deterministisch und daher leicht zu simulieren und zu verifizieren. Um eine einfache Adaption auf unterschiedliche Ruderstellsysteme zu gewährleis-

ten, werden die Systemparameter wie etwa Maschinenparameter, mechanische Bestimmungsgrößen oder Reglerparameter in einem nachladbaren Flashspeicher abgelegt. Der eigentliche Regelalgorithmus muß aus Sicherheitsgründen in einem Festwertspeicher abgelegt werden. Mit diesem Vorgehen kann bei Austausch einzelner Komponenten wie etwa ein verbesserter Aktuator oder ein Getriebe mit verändertem Übersetzungsverhältnis eine Adaption des Ruderstellsystems ohne Ausbau oder Austausch der Elektronik vorgenommen werden.

Bei der Definition des Stellgliedes Leistungselektronik wird zwischen Linearverstärkern und gepulsten Wechselrichtern unterschieden. Aufgrund der deutlich geringeren Verluste von geschalteten Umrichtern sind diese als Stellglieder für Aktuatoren in Ruderstellsystemen zu bevorzugen. Anwendbar sind beispielsweise Verfahren der Pulsweitenmodulation.

Aufgrund des Störeinflusses geschalteter Umrichter sind die Komponenten Signalelektronik und Leistungselektronik elektrisch potentialgetrennt voneinander aufzubauen.

2.2 Auswahl der Komponenten

2.2.1 Aktuator

Eine zentrale Rolle bei Auslegung eines Ruderstellsystems spielt die Auswahl des Aktuators. Am besten werden die Anforderungen nach 2.1 von einer bürstenlosen, permanenterragten Synchronmaschine mit Hochenergiemagneten erfüllt [1]. Die inzwischen gesunkenen Preise dieser Maschine gehen einher mit der auf das Einbauvolumen und Gewicht bezogenen höchsten Leistungsdichte aller Maschinen. Durch das Fehlen jeglicher Schleifvorrichtungen hat dieser Maschinentyp neben der Asynchronmaschine den geringsten Wartungsaufwand und eine hohe Zuverlässigkeit. Zu berücksichtigen ist allerdings, daß die Permanentmagnete oberhalb einer Grenztemperatur irreversibel entmagnetisiert werden. Eine Thermalanalyse des Ruderstellsystems ist daher zumindest für worst case Fälle in jedem Fall durchzuführen.

2.2.2 Lagegeber

Zur Bestimmung des absoluten Winkels der Welle und damit der Polradlage der Synchronmaschine eignen sich für Ruderstellensysteme Resolver am besten. Sie sind preisgünstig, haben ein geringes Volumen und liefern in der Ausführung mit einem Drehtransformator nach einem PowerUp sofort den gesuchten Winkel mit einer Auflösung von bis zu 16Bit je Umdrehung. Hilfsvorrichtungen zur Ermittlung des Ausgangswinkels sind nicht erforderlich. Durch das Fehlen jeglicher optischer oder schleifender Vorrichtungen haben diese Lagegeber die höchste Zuverlässigkeit. In Form einer Quadratsummenbildung aus den Sinus- und Cosinus-Ausgangsgrößen verfügen Resolver außerdem über eine integrierte Selbsttestfunktionalität. Allerdings muß der Winkel in der Signalelektronik nach BILD 1 erst durch die verhältnismäßig zeitintensive Bildung des 4-Quadranten-Arcustangens ($\text{atan2}()$) aus dem Sinus und Cosinus des gesuchten Winkels ermittelt werden.

2.2.3. Elektronische Komponenten

Im Sinne der Kostenminimierung sollte weitestgehend auf Standardkomponenten zurückgegriffen werden.

Der Prozessor der Signalelektronik ist so zu wählen, daß die Leistungsfähigkeit zur Berechnung der erforderlichen Funktionen ausreicht. Bezüglich der Zuverlässigkeit sind jedoch Prozessoren mit geringer Integrationsdichte, breitem Einsatz und langjähriger Erprobung vorzuziehen. Um diese zunächst widersprüchlichen Forderungen zu vereinen, müssen vereinfachte Regelverfahren gefunden werden, die zum einen die Funktionalität des Ruderstellensystems nicht beeinflussen und zum anderen ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit bieten.

Um der Forderung nach einfacher Adaption auf Systemmodifikationen Rechnung zu tragen, muß möglichst viel Funktionalität des Ruderstellensystems in Form von Software realisiert werden.

Dies ist in erweitertem Sinne auch in Bezug auf Hardware zu verstehen, d.h. die Realisierung von hard wired Schaltungen durch programmierbare Logikbausteine.

Als Stelleinrichtung des Synchronmotors sollten integrierte Leistungstreiber Verwendung finden. Sie sind kostengünstig, hoch kompakt und unterliegen einer fortlaufenden Weiterentwicklung. Außerdem bieten sie den Vorteil von bereits in das Modul integrierten, sehr guten Wärmeableitvorrichtungen der Schaltverluste auf die Struktur des Fluggerätes.

2.2.4 Getriebe

Um den geringen Platzverhältnissen und den restriktiven Gewichtsforderungen im Fluggerät gerecht zu werden, ist zur Bereitsstellung des gewünschten Scharniermomentes eine Getriebe notwendig. Dieses überträgt die mechanische Leistung eines schnelllaufenden Synchronmotors mit geringem Bauvolumen auf das Ruder. Daraus ergeben sich Forderungen nach einer hohen Dynamik (Drehbeschleunigungen $>1 \cdot 10^5 \text{ rad/s}^2$) und Laufgeschwindigkeit (Drehraten $>1 \cdot 10^4 \text{ min}^{-1}$) des Syn-

chronmotors. Auch diese Forderungen bestätigen nochmals, daß Lagegeber und Aktuatoren mit Schleifvorrichtungen nicht verwendet werden können.

3 REGELUNG

3.1 Regelungskonzept

Aufgabe der Regelung des Ruderstellensystems ist, die vom FCC kommandierte Ruderposition oder Ruderdrehrate möglichst verzögerungsfrei einzustellen. Hierzu wird das Konzept mehrfach unterlagertes, einschleifiger Regelkreise mit vollständiger Zustandsrückführung entsprechend BILD 3 verwendet. Dieses Verfahren ist einer vollständigen Zustandsregelung vorzuziehen, da im ersten Fall Nebenbedingungen in Form von Stellsignalgrenzungen eingebracht werden können. Außerdem können unterlagerte, zeitkritische Regelkreisteile häufiger als überlagerte Regelkreisteile durchlaufen werden. Außerdem bietet dieses Konzept den Vorteil, daß überlagerte Regelkreisteile abgeschaltet werden können. Das ist beispielsweise dann sinnvoll, wenn anstelle von Positionskommandos Drehratenkommandos vom FCC verschickt werden. In diesem Fall wird der am weitesten außen liegende Positionsregelkreis einfach abgeschaltet beziehungsweise der zugehörige Programmteil nicht durchlaufen. Das Drehratenkommando übernimmt dann die Funktion der Reglerausgangsgröße des Positionsreglers.

3.2 Reglerauslegung

Die Reglerauslegung des Gesamtregelkreises nach BILD 3 erfolgt über Polvorgabe. Nach geeigneter Modellierung der Regelstrecke ergibt sich ein System 3. Ordnung, für das nach Festlegung der gewünschten Regelkreisdynamik die Reglerpole und Nullstellen entsprechend eingestellt werden können [2][5]. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß der Stromregelkreis der Synchronmaschine von außen als ein einfaches PT1-Glied betrachtet werden kann. Um dies zu gewährleisten, ist ein spezielles Stromregelverfahren entwickelt worden.

3.3 Stromregelverfahren

3.3.1 Aufgabenstellung

Das Stromregelverfahren basiert auf dem Ansatz der feldorientierten Regelung. Wird die Leistungselektronik 3-phasig und sinusförmig angesteuert, folgt ein Drehstromsystem zur Stellung des Synchronmotors. Aus den Strangströmen kann dann ein im Raum umlaufender Raumstromzeiger bestehend aus Betrag und Phase gebildet werden [3][4]. Näherungsweise wird genau dann das Moment bei gegebenem Strom maximal, wenn der Raumstromzeiger im elektrischen Sinne orthogonal zum Feld der Permanentmagneten, dem Polradfluß Ψ_F ist; ähnlich der Lorentzkraft auf einen vom Strom durchflossenen, geradlinigen Leiter. In diesem Fall ist die Ausnutzung des Synchronmotors optimal. Aufgabe des Stromregelverfahrens muß es daher sein, entsprechend BILD 2 den Raumstromzeiger der gemessenen Strangströme \underline{i}_{am} in die Querachse q des Läuferkoordinatensystems zu verschieben. Weiterhin muß der Betrag, das heißt die Länge des Raumstromzeigers \underline{i}_{am} , dem des

kommandierten Raumstromzeigers i_{ac} entsprechen. Für die Regelabweichungen δi_a und $\delta \varepsilon$ in Betrag und Phase nach BILD 2 muß daher im ausgeregelten Zustand gelten:

- (1) $\delta i_a := 0$
- (2) $\delta \varepsilon := 0$

Um diese Vorgaben möglichst direkt in den Regelalgorithmus implementieren zu können, werden im folgenden alle Raumzeigergrößen in polaren Koordinaten dargestellt.

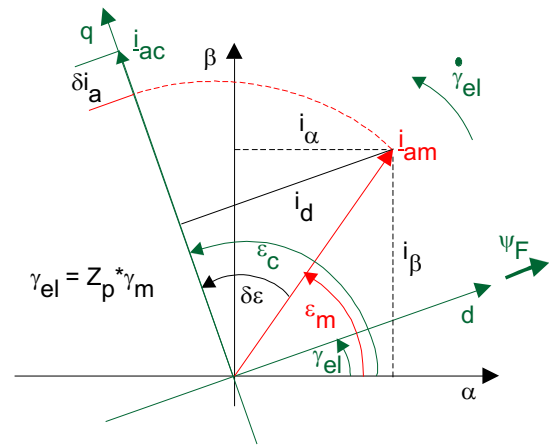
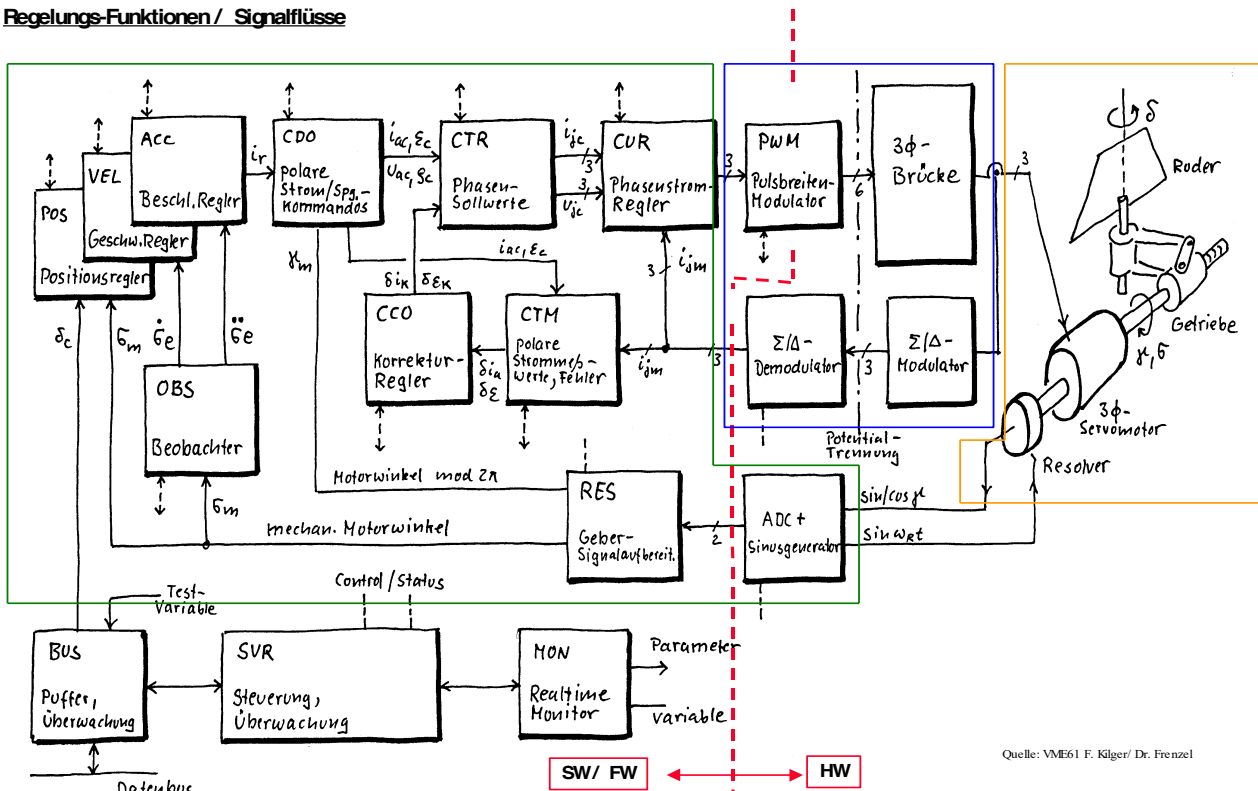


BILD 2: Raumstromzeigerdarstellungen der Ströme

3.3.2 Polare Kommandos

Das Stromregelverfahren wird mit Hilfe zweier unterlagerter Stromregelkreise realisiert, einem äußeren Stromkorrekturregelkreis und einem inneren Phasenstromregelkreis.

Regelungs-Funktionen / Signalflüsse



Quelle: VME61 F. Kilger/ Dr. Frenzel

BILD 3: Regelungskonzept moderner Fly-by-wire Ruderstellensysteme

Die Eingangsgrößen des Stromkorrekturreglers sind polare Strom- und Spannungskommandos, die zunächst entsprechend BILD 3 aus der Reglerausgangsgröße des Beschleunigungsreglers i_r und dem Motorwinkel γ_m im Block CDO gebildet werden müssen.

Der Spannungsbetrag u_{ac} und die zugehörige Phase ρ_c bilden hierbei den Raumstromzeiger der Gegen-EMK der Synchronmaschine nach und werden zu deren Kompensation benötigt.

3.3.3 Stromkorrekturregelkreis

Der Stromkorrekturregelkreis in BILD 3 besteht aus den Blöcken CTM, CCO und CTR.

Im Block CTM wird zunächst aus zwei der drei Strangstrommeßwerte der Betrag des Raumstromzeigers i_{am} bestimmt und daraus der Betragsfehler

$$(3) \delta i_a = i_{ac} - i_{am}$$

gebildet. Ein entscheidender Punkt ist nun, daß man nicht, wie man zunächst vermuten könnte, die Phase ε_m aus den 4-Quadranten-Arcustanges der Stromkomponenten i_α und i_β bildet und daraus folgend den Winkelfehler aus $\delta\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_m$. Dies hat zum einen den Vorteil, daß keine weitere rechenzeitintensive atan2()-Auswertung zu erfolgen hat. Vielmehr aber versagt dieses Vorgehen für den bei einer Synchronmaschine durchaus zulässigen Fall, daß der Betrag des Raumstromzeigers i_{am} verschwindet. In diesem Fall ist ε_m unbestimmt. Anstelle des Winkeldifferenz $\delta\varepsilon$ wird daher mit der Ersatzgröße

$$(4) \begin{aligned} i\delta\varepsilon &= i_\alpha \cdot \sin(\varepsilon_c) - i_\beta \cdot \cos(\varepsilon_c) \\ &= i_{am} \cdot \sin(\varepsilon_c - \varepsilon_m) \\ &= i_d \cdot \text{sign}(i_r) \end{aligned}$$

gerechnet. Die Größe $i\delta\varepsilon$ ist ein direktes Maß für die rotorbezogene Längskomponente i_d des Raumstromzeigers i_{am} und somit für die Winkelfehlstellung. Ist der Betrag des Meßstromes identisch Null, so verschwindet ebenfalls die Ersatzgröße in (4).

Die so ermittelten Fehlergrößen sind die Eingangsgrößen eines Betrags- und eines Phasenkorrekturreglers im Block CCO. Beide Regler sind einfache PI-Regler und liefern die Reglerausgangsgrößen δi_k und $\delta\varepsilon_k$ bezüglich Amplitude und Phase.

Die Reglerausgangsgrößen δi_k und $\delta\varepsilon_k$ werden nun im Block CTR zu den kommandierten Werten des Betrages und der Phase des Raumstromzeigers i_{ac} mit

$$(5) i_{ak} = i_{ac} + \delta i_k$$

$$(6) \varepsilon_k = \varepsilon_c + \delta\varepsilon_k$$

hinzuaddiert. Das so korrigierte Stromkommando wird ebenso wie das Kommando zur EMK-Kompensation dann im Block CTR auf die zugehörigen Phasengrößen umgerechnet.

Der Stromkorrekturregelkreis bestimmt somit die Fehlstellung des Raumstromzeigers i_{am} in Betrag und Phase und schaltet die Fehlergrößen nach Durchlaufen eines Korrekturreglers auf das ursprüngliche polare Stromkommando. Dieses Vorgehen bewirkt die Korrektur der Betrags- und Phasenabsenkung im Strom der Synchronmaschine bei zunehmenden Drehzahlen. Es hat sich gezeigt, daß gerade für hohe Maschinendrehzahlen in Kombination mit Polpaarzahlen $Z_p > 1$ dieses Stromkorrekturverfahren zwingend erforderlich ist. Anderenfalls führt die Fehlstellung des Raumstromzeigers zu einem Vergrößern der Fehlerstromkomponente i_d . Dadurch werden die Bemessungsdrehraten sowie das Bemessungsmoment nicht erreicht und die Maschine wird unerwünscht erwärmt.

3.3.4 Phasenstromregelkreis

Die im Stromkorrekturregelkreis berechneten, korrigier-

ten und auf die einzelnen Phasen umgerechneten Stromsollwerte dienen als Stromkommandos für die Phasenstromregelkreise der einzelnen Stränge der Maschine. Die Struktur der Phasenstromregelkreise in BILD 4 sind einschleifige Regelkreise mit P-Anteil und Führungsgrößenumformer.

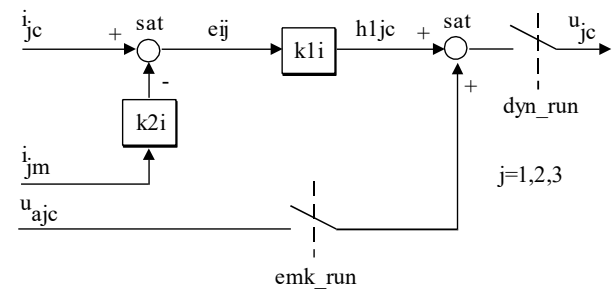


BILD 4: Stromkorrekturregelkreis der Phase j

Die Verstärkungen $k1i$ und $k2i$ werden mit

$$(7) k1i = 1 - \frac{1}{k2i}$$

auf asymptotisches Folgen bei sprunghörmiger Erregung eingestellt. Die Größen u_{ajc} sind die auf die Phase j umgerechneten Werte der Gegen-EMK und werden zur Kompensation auf die Reglerausgangsgrößen der Phasenstromregler addiert.

3.3.5 Anmerkungen

Mit dem vorgestellten Verfahren können vollständig digitale Stromregelkreise für schnellaufende Synchronmaschinen auch auf verhältnismäßig langsamen Mikroprozessoren realisiert werden. Dies hat den Vorteil, daß die üblicherweise voluminösen, analogen Realisierungen entfallen können und somit eine deutliche Verkleinerung des Gesamtregelkreises erreicht werden kann. Weiterhin bietet die Digitalisierung den Vorteil, daß Adaptionen und neue Parametrierungen schnell und preiswert vorgenommen werden können. Allerdings wird dieser Vorteil durch eine verhältnismäßig komplizierte Algorithmen erkaufte.

Damit der Stromregelkreis seine gewünschte Funktion erfüllen kann, ist in jedem Fall zu beachten, daß Totzeitkompensationen durchgeführt werden müssen. Dies gilt auch für die restlichen Teile des Gesamtregelkreises wie etwa den Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsregelkreis.

Das vorgestellte Stromregelverfahren wurde zur Patentierung eingereicht.

4 BEISPIEL

Als Beispiel wird ein nach dem beschriebenen Verfahren aufgebautes Ruderstellsystem eines zukünftigen Luft-Luft-Lenkflugkörpers mittlerer Reichweite vorgestellt. Das Ruderstellsystem wurde im Rahmen eines Demonstratorprogrammes angefertigt und ist in BILD 5 dargestellt. Es besteht aus zwei Rudereinheiten, die in einer mechanischen Struktur montiert sind. Pro Ruder wird jeweils eine Signalelektronik und ein Leistungsteil zur unabhängigen Stellung der Ruder verwendet. Zur zentralen Ansteuerung wurde ein FCC Busmastersimu-

lator aufgebaut, der beide Ruder über einen synchron seriellen Bus mit Winkelkommandos versorgt.

Die Darstellungen in BILD 6 zeigen den Ruderwinkel, die Drehrate und Beschleunigung an der Welle der Synchronmaschine bei einem Sollwertsprung des Ruderwinkels von 0 auf 10 Grad.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Das Hauptziel neuerer Fly-by-wire-Steuerungen besteht darin, durch Dezentralisierung einen Gewichts-, Volumen- und Kostenvorteil gegenüber herkömmlichen Systemen zu erreichen. Weitere Vorteile sind die erweiterte Selbsttestfunktionalität sowie die Erweiterung der einzelnen Subsystemkomponenten durch Continuous Built In Test-Funktionen zur fortlaufenden Funktionskontrolle. In diesem Beitrag wurde ein volumen- und gewichtsoptimiertes, elektromechanisches Ruderstellsystem vorgestellt, das die geforderten Randbedingungen erfüllt. Zum Erreichen dieses Ziels mußte ein neues, digitales Stromregelverfahren für hohe Laufgeschwindigkeiten und Drehbeschleunigungen an der Aktuatorwelle entwickelt werden. Zur Darstellung der Machbarkeit der beschriebenen Ansätze diente ein Demonstrator eines Luft-Luft-Lenkflugkörpers mittlerer Reichweite.

Ein Blick auf die massen- und volumenbezogenen Leistungen p_M und p_V zeigt, daß der realisierte Demonstrator Leistungsdichten von $p_M=573$ W/kg und $p_V=1,35$ W/cm³ aufweist. Bei einem Vergleich mit hydraulischen Stelleinrichtungen ähnlicher Baugröße ist zu beachten, daß keine weiteren Vorrichtungen wie etwa Hydraulikpumpen, Ölleitungen etc. zum Betrieb des Stellsystems nötig sind. Ein Vergleich der Leistungsdichten mit hydraulischen Stelleinrichtungen einer höheren Leistungsklasse ist direkt nicht möglich, da das benötigte Gewicht und Volumen der elektromechanischen Stellantriebe bei steigenden Leistungen deutlich weniger zunimmt. Dies liegt zum einen am steigenden Wirkungsgrad größerer Aktuatoren. Zum anderen bleibt der Beitrag zum Gewicht und Volumen einer Reihe von Komponenten wie etwa Resolver, Signal- oder Leistungselektronik nahezu oder gänzlich konstant. Eine einfache Skalierbarkeit der erzielten Ergebnisse ist daher nicht zulässig.

Insgesamt ist anzumerken, daß das vorgestellte Konzept eine deutliche Verbesserung bisheriger elektromechanischer Ruderstellantriebe darstellt. Inwiefern das dargestellte Verfahren im Rahmen der Bestrebungen „More Electric Aircraft“ zu verwenden ist, gilt es zukünftig zu untersuchen. Ein vielversprechender Ansatz ist zunächst die Verwendung im Bereich der sekundären Flugsteuerung.

6 LITERATUR

- [1] B. Frenzel,
Entwurf und Aufbau einer bürstenlosen Gleichstrommaschine für ein Herzunterstützungssystem, Verlag Dr. Köster, Berlin 1998
- [2] D. Graham et. al.
The Synthesis of Optimum Transient Response: Criteria and Standard Forms, AIEE Proceedings, 1953, New York, pp 273-288
- [3] D. Schröder,
Elektrische Antriebe 1, Springer Verlag, Berlin 1994
- [4] G. Müller,
Grundlagen elektrischer Maschinen, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1994
- [5] O. Föllinger,
Regelungstechnik, Hüthig Verlag, Heidelberg 1994
- [6] U. Klingauf et. al.
Ansätze eines effizienten Entwicklungsprozesses für zukünftige Flight Control Systeme, DGLR Jahrbuch 1999, Band III, Bonn 2000
- [7] Rauch, J.
Digitales Flugführungssystem für Kampfflugzeuge. Beitrag zum Lehrgang F4.05: Moderne Reglerunterstützung für den Piloten. Carl-Cranz-Gesellschaft, Braunschweig 1990

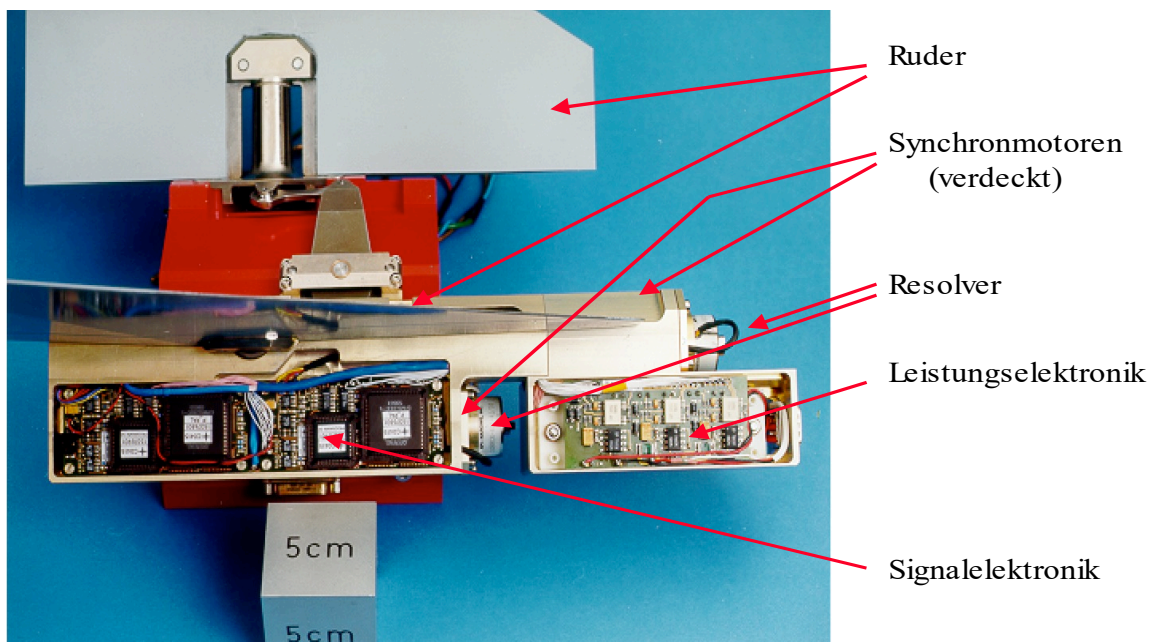
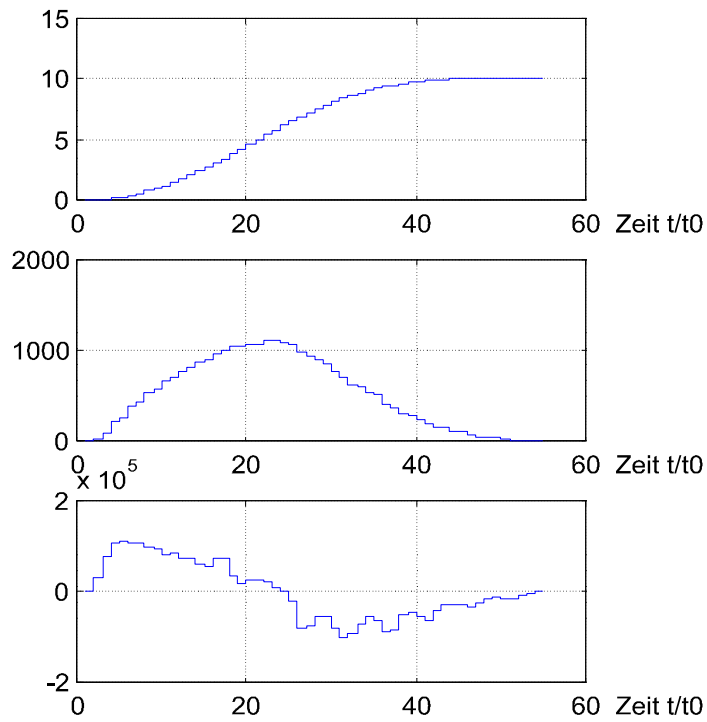


BILD 5: Demonstrator eines elektromechanischen Ruderstellsystems (Gesamtgewicht ohne Ruder 3,3 kg, Gesamtvolumen ohne Ruder 1398cm³, mech. Bemessungsleistung je Ruder 945W, mech. Bemessungsdrehrate am Ruder 9 rad/s)

sampling interval $t_0 = 0.000768\text{sec}$



Ruderwinkel δ_m Grad

Drehrate $\dot{\gamma}_m$ rad/s

Drehbeschleunigung $\ddot{\gamma}_m$ rad/s²

fin shaft angle (out of PRAM)

Dasa - LFK VME61 17-May-2000

prog: dispres.m data: dem4.adv

BILD 6: Ruderwinkel, Drehrate und Drehbeschleunigung bei Sollwertsprung auf 10 Grad