

Zur Regelung von stufenlosen Kettenwandlern in Getriebesystemen

Stufenlose Getriebe gewinnen sowohl bei mobilen Arbeitsmaschinen als auch im Pkw stetig an Bedeutung. Eine spezielle Bauart von stufenlosen Getrieben stellen Umschlingungsgetriebe nach dem Prinzip PIV-Reimers (Zugkettenwandler) dar. Neue Anwendungen erhöhen die Anforderungen an die Steuerung und Regelung dieser Getriebe. Wichtigste Regelgrößen sind hier die Übersetzung und die Verstellrate (di/dt).

Dipl.-Ing. Roland Mölle ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Arbeitsbereichs „Mobile Arbeitsmaschinen“ (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. K. Th. Renius) am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (Prof. Dr.-Ing. B. Heifling) der Technischen Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching; e-mail: moelle@ltm.mw.tum.de

Schlüsselwörter

CVT, stufenloses Getriebe, Kettenwandler, Bereichsschaltung, Getrieberegung, RCP, Matlab/Simulink

Keywords

CVT, continuously variable transmission, chain converter, range shift, transmission control, RCP, Matlab/Simulink

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 03613 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/lo-cal/fliteratur.htm> abrufbar.

Bereits in der Vergangenheit waren Zugkettenwandler Schwerpunkt von Forschungsprojekten am Lehrstuhl für Landmaschinen der Technischen Universität München. Diese befassten sich teils mit Traktoren [1], teils mit Pkws: Die Ergebnisse eines von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderten, lehrstuhlübergreifenden Projekts wurden 2002 mit der Vorstellung des „Autarken Hybrid“ präsentiert [2]: Ein Pkw mit parallelem hybriden Antriebsstrang, der auf einem serienmäßigen Opel Astra Caravan mit Dieselmotor basiert und zusätzlich mit einer elektrischen Antriebsmaschine (120 V, 4 Quadranten) und einem speziell entwickelten Kettenwandlergetriebe großer Spreizung in i^2 -Bauweise ausgestattet wurde. Vorgestellt wird der hierfür am Lehrstuhl gewählte Regleransatz für die Getriebeübersetzung sowie dessen Weiterentwicklung zur universellen Verwendung etwa im Traktoreinsatz.

Getriebestruktur des Autarken Hybrid

Bild 1 zeigt die Getriebestruktur des Autarken Hybrid. Das Getriebe ist durch zwei Fahrbereiche charakterisiert. Im ersten Fahrbereich (V1) ist die Kupplung L1 geschlossen und die Wandlerwelle C wird angetrieben. Die Klauenkupplung K1 ist ebenfalls geschlossen und Welle B des Wandlers ist mit dem Abtrieb (E) verbunden. In der Endübersetzung des Fahrbereichs V1 gehen die Differenzdrehzahlen aller vier Kupplungen bei einer Wandlerübersetzung von etwa $i = 0,458$ gegen Null und der so genannte Synchronpunkt wird erreicht. In diesem Betriebspunkt kann die zweite Klauenkupplung K2 geschlossen und die nasse Lamellenkupplung L1 kann geöffnet werden. Im so erreichten Fahrzustand (SYN) überträgt der Antriebsstrang nach wie vor Leistung. Der Kettenwandler liegt dabei nicht mehr im Kraftfluss. Weiteres Beschleunigen führt zum Betrieb im zweiten Fahrbereich: Durch Schließen der Kupplung L2 und gleichzeitiges Öffnen der Kupplung K1 werden im Vergleich zum ersten Fahrbereich Antriebs- und Abtriebswelle des Wandlers vertauscht und der Fahrbereich V2 wird in Anfahrübersetzung des Wandlers erreicht. Es ergibt sich eine Gesamtgetriebespreizung von $\sim 22,5$.

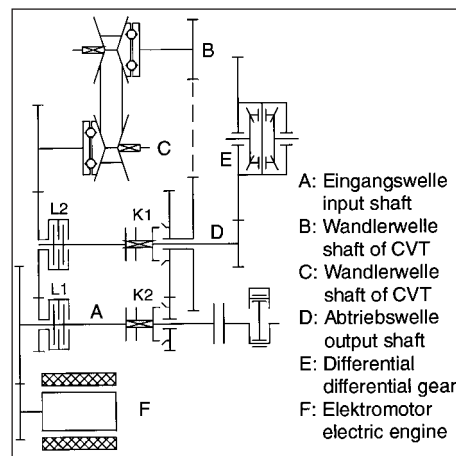


Bild 1: Getriebestruktur des Autarken Hybrid mit PIV-Kettenwandler

Fig. 1: Structure of the gearbox of Autarkic Hybrid with PIV chain CVT

Synchronpunktregelung ~ im Autarken Hybrid

Um einen schnellen, komfortablen und erfolgreichen Umschaltvorgang zu ermöglichen, ist es notwendig, die Wandlerübersetzung im Synchronpunkt exakt zu regeln. Dies geschieht durch geeignete Einstellung der Anpressdrücke. Die Anpresskräfte müssen zum einen groß genug sein, um eine Beschädigung durch ein Durchrutschen der Kette zu verhindern, auf der anderen Seite muss ein bestimmtes Anpresskraftverhältnis, das so genannte ζ -Verhältnis (Anpresskraftverhältnis von treibendem zum getriebenen Scheibensatz) [3] erreicht werden. Im konventionellen PIV-Anpresssystem wird der Mindestanpressdruck automatisch durch eine drehmomentabhängige Drosselung des Ölstroms in den so genannten Drehmomentfühlern erzielt. Ein zusätzliches Ventil (Vierkantensteuerschieber) dient dazu, einen der beiden Anpressdrücke durch zusätzliche Drosselung weiter zu erhöhen, um für stationäre Zustände das erforderliche ζ -Verhältnis zu erreichen. Letzteres hängt dabei vom übertragenen Moment und dem gewünschten Übersetzungsverhältnis ab. Darüber hinaus kommt es aufgrund der umlaufenden Kette und der sich drehenden Wandlerwellen (rotierende Hydraulikzylinder) zu einer Beeinflussung der Anpresskräfte, weshalb die Drehzahl als zusätzliche Störgröße

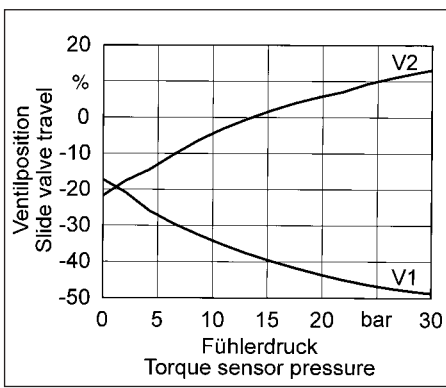


Bild 2: Stellgröße in Abhängigkeit vom Fühlerdruck

Fig. 2: Manipulated variable versus torque pressure

zu betrachten ist. Geht man bei Umschaltvorgängen von einem eher eingeschränkten Drehzahlband und einer festen Übersetzung (Synchronpunkt) aus, bleibt als Störgröße das übertragene Drehmoment. Aufgrund des Wechsels zwischen der Lage des Wändlers im oder außerhalb des Kraftflusses kommt es während eines Umschaltvorgangs zu extrem hohen Drehmomentgradienten. Folglich ändert sich ebenfalls das erforderliche ζ -Verhältnis, wodurch es zu einer Abweichung der Übersetzung kommt, da der konventionelle Übersetzungsregler lediglich auf tatsächlich vorliegende Übersetzungsabweichungen reagieren kann und somit eine gewisse Zeit zum Ausgleich einer Abweichung benötigt. Ein erfolgreicher Umschaltvorgang wird dadurch verhindert oder zumindest verzögert.

Aus diesem Grund wurde die Regelung um eine Störgrößenaufschaltung erweitert. Da das aktuelle Eingangsmoment in Form des gemessenen Fühlerdrucks vorliegt, und die Stellgröße die Vierkantensteuerschieberposition darstellt, die eine entsprechende Differenz in den Anpressdrücken bewirkt, wurde der Drehmomenteinfluss in Form einer Kennlinie der Ventilposition über dem Fühlerdruck hinterlegt (Bild 2). Hierdurch minimiert sich auch die notwendige Rechenleistung für die Störgrößenaufschaltung und kurze Taktzyklen beim Einsatz typischer Microcontroller-Hardware (16 bit, 20 MHz) bleiben möglich. Die gezeigten Kennlinien gelten für den Zugbetrieb. Im Schubbetrieb ist die Kennlinie des jeweils anderen Fahrbereichs zu verwenden. Schließlich wurde auch der Einfluss der Antriebsdrehzahl näher untersucht und in die Reglerstruktur integriert. Die beschriebenen Maßnahmen führten zu einer deutlich gesteigerten Regelgüte und Verlässlichkeit des Umschaltvorgangs.

Erweiterte Reglerstruktur für universelle Kettenwandleranwendungen

Bei der Übersetzungsregelung des Kettenwändlers über den gesamten Spreizungsbe- reich hat sich eine strukturvariable Regelung

bewährt: Durch die Verwendung unterschiedlicher Parametersätze, zwischen denen abhängig von der Größe der Regeldifferenz gewechselt wird, kann trotz des Einsatzes von Integralanteilen in den Parametern zum Abbau bleibender Regeldifferenzen ein stabiles Systemverhalten erreicht werden. Die Umschaltung zwischen den einzelnen Parametersätzen erfolgt mit einer Hysterese. Darüber hinaus gestaltet sich die Parameterfindung relativ einfach, da nur die jeweils relevanten Betriebsbereiche betrachtet werden müssen. Durch zusätzliches Zurücksetzen von eventuell aufgebauten Integralanteilen und der ausgegebenen Stellgröße auf vordefinierte Neutralwerte beim Erreichen bestimmter Grenzen der Regeldifferenz kann ein besonders ausgeglichenes Systemverhalten ohne Überschwinger (erhöhter Fahrkomfort) erreicht werden. Bild 3 zeigt den Übersetzungsverlauf eines Traktors mit Kettenwandlergetriebe im Anhängerbetrieb und softwareseitig emuliertem Stufenmodus mit und ohne Reset des Reglers, bei ansonsten identischer Parametrierung. Im Fahrversuch wurde ein Überschwinger insbesondere beim Herunterschalten als sehr unangenehm empfunden.

Im nächsten Entwicklungsschritt wurde die Reglerstruktur unter Zuhilfenahme eines RCP-Systems unter Matlab/Simulink® ebenfalls um eine Störgrößenaufschaltung erweitert, durch die nun zusätzlich die Übersetzung berücksichtigt wird. Um eine größere Flexibilität im Einsatz mit unterschiedlichen Anpresssystemen zu erreichen, wurden die Störgrößen nun auf die unterste Ebene reduziert: Anstelle der bisher verwendeten Ventilposition oder der Anpressdrücke werden die Anpresskräfte betrachtet.

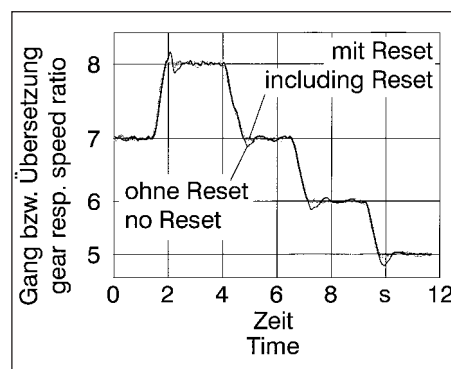


Bild 3: Auswirkung des Zurücksetzens des Reglers

Fig. 3: Influence of resetting the controller

Als wichtigste auftretende Nichtlinearität wird das ζ -Verhältnis für den stationären Zustand in einem entsprechenden Diagramm abgebildet. Aus der gegebenen Anpressbedarfstrategie ergibt sich die Mindestanpresskraft, aus der sich entsprechend dem hinter-

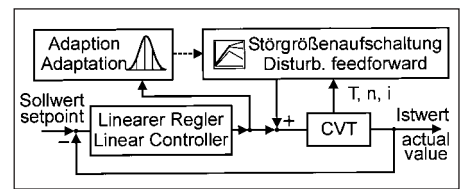


Bild 4: Vereinfachte Struktur des Übersetzungsreglers

Fig. 4: Simplified structure of the ratio controller

legten ζ -Verhältnis für den aktuellen Betriebszustand die zweite, höhere Anpresskraft ergibt. Beide werden unter Berücksichtigung des Drehzahleinflusses (Fliehöl) in Anpressdrücke umgerechnet und entsprechend den Besonderheiten des jeweiligen Anpresssystems (etwa Ventilkennlinie) ausgegeben. Abweichungen vom Sollwert gleicht der Übersetzungsregler durch Erhöhung eines der beiden vorgegebenen Drücke aus.

Das ζ -Kennfeld des jeweiligen Wändlers wird während des Betriebs adaptiv ermittelt. Dabei macht man sich zunutze, dass die Stellgröße des linearen Übersetzungsreglers im stationären Zustand gegen Null gehen sollte (Bild 4). Ist dies nicht der Fall, wird das Kennfeld entsprechend angepasst. Da das Kennfeld aus einer endlichen Anzahl von Stützstellen besteht, muss hierzu mit Hilfe von Gewichtungsfunktionen entschieden werden, welche und in welchem Maße Stützstellen angepasst werden. Im Hinblick auf den Einsatz serientauglicher Controller-Hardware wurden hier neben der üblichen Gauß-Funktion auch weniger rechenintensive Funktionen implementiert.

Die Reglerstruktur kann einfach an verschiedene Getriebevarianten und Anpressstrategien angepasst werden. Sowohl das konventionelle PIV-Anpresssystem als auch ein neu entwickeltes druckgeregeltes Anpresssystem [4] wurden berücksichtigt. Im ersten Schritt wurde auch hier der Mindestanpressdruck proportional zum höheren Moment der beiden Wandlerwellen gewählt (entsprechend dem konventionellen Zweifühler-Anpresssystem). Weitere Optimierung ist durch die Anpassung an die tatsächlich erforderlichen Anpresskräfte möglich [5].

Die Verwendung des ζ -Verhältnisses im neuen Reglerentwurf führt zu einer besseren Regelgüte bei der Übersetzungsregelung. Bei manchen Anwendungen ist jedoch die Vorgabe einer Verstellrate vorteilhafter [6], was durch eine einfache Modifikation möglich wird: Die Verstellrate steht in einem proportionalen Zusammenhang zur Differenz der Anpresskräfte für den stationären Zustand und den tatsächlichen Anpresskräften. Da die Kräfte für den stationären Zustand aus dem ermittelten ζ -Kennfeld folgen, können die tatsächlichen Anpresskräfte hiervon abweichend, entsprechend der gewünschten Verstellrate vorgegeben werden.