

Lettner, Ernst: "Selbsteinstellendes und selbstanpassendes Antriebsregelsystem für die Asynchronmaschine mit Stromzwischenkreisumrichter." D17 Darmstädter Dissertation 1991 (Übersicht)

Einrichtungen und Maßnahmen, mit denen der menschliche Arbeitseinsatz für Produktion und Betrieb elektrischer Antriebe minimiert werden kann, sind Entwicklungsziele, die seit Einführung der Mikrorechner in die Antriebe bemerkenswerte Fortschritte erzielt haben. Ein Teil des für den Betrieb erforderlichen Arbeitseinsatzes beinhalten (neben der Fehlersuche im Störfall) die Anpassungen und Einstellungen während der Inbetriebnahme des Antriebes. Folgerichtig begann die Entwicklung von selbsteinstellenden Antriebs-Regelsystemen mit dem "klassischen" regelbaren Antrieb, dem Gleichstromantrieb, zu dem Zeitpunkt als der Mikrorechner entsprechende Realisierungsmöglichkeiten bot. Dies führte 1985 zur Dissertation Kroth an diesem Institut. Die Regelung der umrichter gespeisten Asynchronmaschine ist wesentlich komplexer als die der Gleichstrommaschine, wodurch auch die Inbetriebnahme schwieriger und aufwendiger wird. Dies ist einer der Gründe, der lange die rasche Verbreitung derartiger Antriebe behindert hat. Mit dem selbsteinstellenden Regelsystem für die Asynchronmaschine am Spannungszwischenkreisumrichter wurde 1987 an diesem Institut mit der Dissertation Schierling ein viel beachteter Fortschritt erzielt, der inzwischen weitgehend in die industrielle Praxis übertragen wurde.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines selbsteinstellenden Regelsystems für die Asynchronmaschine am Stromzwischenkreisumrichter. Das Regelsystem bedient hier zwei Stellglieder: Den netzseitigen Stromrichter (wie beim GS-Antrieb) und den maschinenseitigen Stromrichter mit Phasenfolgelöschung. Die Regelungseigenschaften beider Stellglieder bestimmen das Antriebsverhalten und sind Gegenstand der Selbsteinstellung. Grundlage dieser und der vorangegangenen Arbeiten ist die Vorabkenntnis der Struktur der Regelstrecke bestehend aus Stromrichtern und Asynchronmaschine. Für die unterstellte Struktur müssen damit "lediglich" die Strecken-Parameter ermittelt und damit die Reglereinstellungen berechnet werden. Dies kann so effizient gestaltet werden, daß im Antrieb für die Selbsteinstellung praktisch keine zusätzliche Rechnerleistung installiert werden muß, sondern während der Inbetriebnahmephase wird die im Normalbetrieb ohnehin erforderliche Rechnerleistung durch die Programme zur Selbsteinstellung genutzt.

Die Stromrichter haben zwei Eigenschaften, die von der Regelung besonders berücksichtigt werden müssen: Die arbeitspunktabhängige Kommutierungsverzugszeit und die stark nichtlineare Zwischenkreisdrossel. Letztere vermeidet aufgrund großer Induktivität bei kleinem Strom das Lücken und ermöglicht bei großem Strom schnelle Änderungen.

In Kap. 3 und 4 wird das Regelkonzept und seine Realisierung behandelt, während Kap. 5 die Selbsteinstellung und Selbstanpassung beschreibt.

Regelkonzept:

Wie bei feldorientierten Verfahren üblich, wird die momentenbildende Soll-Stromkomponente durch einen P-I Drehzahlregler und die flußbildende Soll-Stromkomponente durch einen Flußregler vorgegeben. Der Fluß-Istwert wird über die Nachbildung der (zur Orientierung verwendeten) Rotor-EMK erhalten, während der Sollwert im Feldschwäcbereich über eine Kennlinie abgesenkt wird.

Der Betrag der beiden Soll-Stromkomponenten dient dem unterlagerten Stromregelkreis des netzseitigen Stromrichters als Sollwert; der Winkel zwischen den beiden Soll-Stromkomponenten wird zu dem aus der Orientierung stammenden Winkel des Läuferverkettungsflusses hinzuaddiert und bildet den Ständerstrom-Winkel für den Steuersatz des maschinenseitigen Stromrichters. Zuvor wird dieser Ständerstrom-Winkel aufgrund der berechneten Kommutierungsdauer korrigiert.

Zur Orientierung am Läuferverkettungsfluß wird die Läufer EMK aus gemessenen Klemmenspannungen und -Strömen (näherungsweise) rekonstruiert. Dazu werden maschinenseitig zwei verkettete Spannungen gemessen, die Maschinenströme werden nicht direkt gemessen sondern aufgrund des gemessenen Zwischenkreisstromes und des bekannten Leitzustandes der Wechselrichters ermittelt. Die zur Rekonstruktion der Läufer EMK ebenfalls erforderliche Ableitung der Maschinenströme wird entsprechend aus der Ableitung des Zwischenkreisstromes (di_d/dt) gewonnen. Dieses di_d/dt wird mit Hilfe der gemessenen Spannung über der Zwischenkreisdrossel gebildet.

Aus den beiden Komponenten des EMK-Vektors folgt Betrag und Winkel, letzterer wird in einem Phasenregelkreis, dem die Drehfrequenz und die Läuferfrequenz aufgeschaltet ist, geglättet. Bei niedriger Drehzahl wird die Messung der Maschinenspannung unbrauchbar, der Phasenregelkreis wird inaktiv, nur die Aufschaltungen wirken.

Das oben skizzierte Regelverfahren wird mit einer Hardware, die aus einem Mikrorechner (Intel 80186) und einem Signalprozessor (TMS 320-10) besteht, realisiert. Wie sich im Verlauf der Arbeit zeigte, wäre die heute verfügbare, doppelt so schnelle Version des Mikrorechners alleine auch in der Lage die Aufgabe zu bewältigen. Eine besondere Schwierigkeit liegt darin, daß die Regelung für zwei Stromrichter bis hin zu den Steuersätzen

durch den Mikrorechner ausgeführt wird. Dies wird nur dadurch möglich, daß einfache aber zeitkritische Teilaufgaben an relativ autarke Subsysteme delegiert werden. Beispiele dazu sind:

- Die Zündimpulse für beide Stromrichter werden autark beim Ablauf voreingestellter Zähler ausgegeben.
- Der Zeitpunkt des Nulldurchgangs einer verketteten Netzspannung wird in einem Register abgelegt (Synchronisation des netzgeführten Stromrichters)
- Ein kompletter Satz konsistent abgetaster Messwerte wird durch das autarke A/D-Subsystem bereitgestellt.
- Mittelwertbildende Messung von I_d durch U/F-Wandler und Zähler.

Für den Mikrorechner bleiben hauptsächlich drei asynchrone Echtzeitaufgaben:

1.) Steuersatz des Wechselrichters und Orientierung des Koordinatensystems (höchste Priorität). Diese Berechnung wird mit 6-facher Ständerfrequenz wiederholt. Ihr Ergebnis ist der Zeitpunkt der nächsten WR-Zündung (wird in einen Zähler geladen) und der Startzeitpunkt der nächsten Messwerterfassung (wird ebenfalls in einen Zähler geladen). Nachdem die Messwerterfassung einen kompletten Satz konsistenter Messwerte bereitgestellt hat, fordert sie den Signalprozessor an, der Teilaufgaben, vor allem die Orientierung des Koordinatensystems, erledigt und anschließend den Mikrorechner anfordert. Der Mikrorechner bearbeitet die übrigen Aufgaben, insbesondere den WR-Steuersatz und lädt den Zeitpunkt der nächsten WR-Zündung sowie den Startzeitpunkt der nächsten Messwerterfassung in Zähler. Eine weitere Teilaufgabe des Signalprozessors ist die überlagerte Regelung von Drehzahl und Fluß. Diese wird jedoch nicht bei jeder Anforderung des Signalprozessors bearbeitet, sondern nur wenn ein neuer Drehzahlistwert gemessen wurde, im Mittel alle 10ms.

Signalprozessor und Mikrorechner arbeiten somit synchronisiert, die Aufgaben des Signalprozessors könnten auch durch einen schnelleren Mikrorechner mit übernommen werden.

2.) Steuersatz und Stromregelung des netzgeführten Stromrichters. Diese Berechnung wird mit 6-facher Netzfrequenz wiederholt und kann durch die nach "1.)" im Konfliktfall zeitlich verzögert werden. Ihr Ergebnis ist der Zeitpunkt der nächsten GR-Zündung (wird in einen Zähler geladen). Mit der GR-Zündung wird die über 60° mittelwertbildende I_d Messung (U/F-Wandler) gestartet. Nachdem dieser Messwert vorliegt, fordert die Messeinrichtung den Mikrorechner an, der die Stromregelung sowie den GR-Steuersatz bearbeitet und als Ergebnis den Zeitpunkt der nächsten GR-Zündung in einen Zähler lädt.

3.) Die Drehzahl der Maschine wird alle 10ms durch Auswertung der vom Drehgeber gelieferten Pulse ermittelt.

Bei der Stromregelung des netzgeführten Stromrichters müssen die Reglerparameter der stark veränderlichen Induktivität der Zwischenkreisdrossel angepasst werden. Die Induktivitätskennlinie wird bei der Inbetriebnahme selbsttätig aufgenommen. Bei dynamischer Stromänderung weicht der gemessene Strommittelwert vom gewünschten Sollwert ab; ein gutes Regelungsverhalten wird erzielt, wenn der Nachführung der Reglerparameter diejenige Induktivität zugrunde gelegt wird, die sich beim Mittelwert von Soll- und Iststrom aus der Kennlinie ergibt.

Für die verschiedenen im System benötigten Regler sind -wie üblich- meist P-I-Regler geeignet, deren Einstellungen mittels klassischer Einstellregeln (Betrags- bzw. symmetrisches Optimum) in Abhängigkeit der noch zu ermittelnden Streckenparameter angegeben werden.

Selbsttätige Inbetriebnahme

In Kap.5 werden die Verfahren zur selbsttätigen Inbetriebnahme hergeleitet und beschrieben. Mit Hilfe der Stromrichter werden Anregungen erzeugt und die als Antwort entstehenden Meßgrößen werden durch das autarke A/D Subsystem, das zusammen mit dem Signalprozessor als mehrkanaliger Transientenrecorder arbeitet, aufgenommen. Die aufgenommenen Signalverläufe werden anschließend mit einem Programm in Hochsprache vom Mikrorechner ausgewertet und daraus die Strecken- sowie die Reglerparameter berechnet. Zunächst muß der Bediener die Typenschild-Angaben sowie einige Grenzwerte eingeben (über PC). Die meisten Messungen werden bei Stillstand ausgeführt.

Die Inbetriebnahme beginnt mit dem Test des Leistungsteils des Netzstromrichters, gefolgt von der Selbstanpassung der Synchronisation des Steuersatzes. Zur Inbetriebnahme der I_d -Regelung muß ein Strompfad z.B. über alle Stränge des I-WR geschaffen werden. Zur ersten Einstellung des I_d -Reglers tastet man sich mit einzelnen Strompulsen, die über gesteuert vorgegebene Zündwinkel ausgelöst sind, an den maximalen Strom heran. Aus dem dabei aufgenommenen $u_d(t)$ und $i_d(t)$ werden erste Näherungen für R_d und die Induktivitätskennlinie ermittelt. Danach ist kontinuierlicher, geregelter Strom möglich. Zur verbesserten Ermittlung von R_d werden vier stationäre Betriebspunkte mit unterschiedlichem Strom für je 20ms angefahren. Bei der Auswertung kann dadurch über eine sehr große Zahl von Messungen gemittelt werden. Abschließend wird die Kennlinie $L_d(i_d)$ durch Anfahren von 16 stationären Strömen und Auswertung der dort aufgezeichneten Kurven hinreichend genau erfasst.

Auch die Inbetriebnahme des I-WR beginnt mit einem Selbsttest des Leistungsteils. Zur Aufladung der Kommutierungs-Kondensatoren dient ein (neues) Verfahren mit Strompulsen über verschiedene WR-Stränge.

Bei der Bestimmung von C_k und Z_k werden zwei Stränge des I-WR bei stehender Maschine als 2-puls-Brücke betrieben (gleichzeitige Kommutierung in beiden Gruppen). Der Wert für C_k wird aus der Änderung der (vom Zwischenkreis aus meßbaren) Kondensatorspannung $u_{ck}(t)$ während der linearen Umladung (bei bekannten I_d) berechnet. Entsprechend wird Z_k aus der Amplitude von $u_{ck}(t)$ am Ende der Diodenkommutierung bei bekanntem I_d bestimmt.

Für die ASM wird zunächst der Ständerwiderstand mittels Gleichspannungs- und Gleichstrommessung (am WR-Eingang) ermittelt. Anschließend wird die Maschine über 2 Stränge mit Gleichstrom aufmagnetisiert. Nach schnellem Stromabbau (durch den GR) wird die Spannung (wenige Volt) welche durch den -mit der Läuferzeitkonstanten langsam abklingenden- Fluß induziert wird, aufgezeichnet. Die Auswertung liefert die Läuferzeitkonstante und den Läuferwiderstand. Zur Bestimmung der Streuinduktivität werden in die entmagnetisierte Maschine möglichst steile Strompulse eingepreßt und die Spannung sowie di/dt ausgewertet. Beim ersten Hochlauf wird das Trägheitsmoment aufgrund des berechneten elektrischen Moments und der gemessenen Drehzahländerung ermittelt, das im weiteren Verlauf noch verbessert und nachgeführt werden kann.

Auf die skizzierte Weise werden innerhalb von ca. 12 Sek. alle benötigten Streckenparameter erfasst und die davon abhängigen Reglerparameter eingestellt. Weiterhin wird eine große Zahl von Tests und Plausibilitätskontrollen zur Erkennung etwaiger Antriebsfehler durchgeführt.

Im abschließenden Kap.6 stellt H. Lettner eine sehr komfortable Entwicklungs- und Bedienungsumgebung mittels PC und Menuesteuerung vor, die inzwischen auch bei anderen Arbeiten am Institut gerne verwendet wird.

P. Mutschler