

Home

Apppliance

Roboteers

Research

Yard

proudly presents

Lastmessung am Schrittmotor

Zielsetzung

Kann man das aktuell abgegebene Drehmoment eines Schrittmotors erkennen, ohne zusätzliche Sensoren zu verwenden? Kann man auf die erreichte relative Rotorposition schließen um präzise Hochlauf- und Bremsrampen zu erzielen? Zum Einsatz kommen Schrittmotoren mit permanentmagnetischem Rotor. Das erarbeitete Prinzip soll sowohl mit bipolaren als auch mit unipolaren Schrittmotoren funktionieren.

Begriffsdefinition

(siehe auch [1] und [2])

Schrittwinkel:	mech. Winkel der Rotorachse zwischen zwei benachbarten Vollschritten
elektr. Winkel:	Phasenlage des erregenden Feldes bei exakt sinusförmiger Ansteuerung der Wicklungen. Wird auch bei der einfacheren rechteckförmigen Ansteuerung verwendet. 4 Vollschrritte entsprechen <u>immer</u> 360° elektr. Winkel
Lastwinkel:	(elektr.) Winkel, um den der Rotor hinter dem erregenden Feld zurückbleibt. Das abgegebene Drehmoment ist 0 wenn der Winkel 0° beträgt, maximal, wenn der Winkel 90° beträgt

Grundlage des Versuches

Prinzipiell ist ein Schrittmotor (im folgenden als SM abgekürzt) ein Synchronmotor. Die Drehzahl ist exakt von der Erregerfrequenz abhängig. Die erreichte Position kann anhand der erregten Zyklen (=Schrittwinkel) genau bestimmt werden. Die Stromaufnahme richtet sich nach dem geforderten Drehmoment. Das Drehmoment reguliert den Lastwinkel [2, Kapitel 7 „Synchronmotoren“]. Kann der Motor das geforderte Drehmoment nicht aufbringen, bleibt der Rotor stehen. Durch den drehenden Rotor wird jederzeit eine Gegen-EMK induziert. Sie hat einen (fast) sinusförmigen Verlauf und ist ein unverzögertes (!) Maß für die Rotorposition. Je schneller der Rotor dreht, umso höher ist die EMK (Induktionsgesetz). Dies verringert die Differenzspannung über dem Wicklungswiderstand und daher den erzielbaren Wicklungsstrom. Bei steigender Rotordrehzahl sinkt also das verfügbare Drehmoment.

Erschwerend kommt hinzu, daß jede Wicklung eine Induktivität besitzt. Daher ist zwischen Wicklungsstrom und Erregerspannung eine Phasenverschiebung zu erwarten. Wegen des Wicklungswiderstandes, des Treiberinnenwiderstandes und des Akkuinnenwiderstandes ist diese nicht 90°. Sie ist ebenfalls frequenzabhängig.

Erste Folgerung(en):

- Der aufgenommene Strom ist ein Maß für das abgegebene Drehmoment. Die Stromaufnahme für ein bestimmtes Drehmoment ist wenigstens vom Motortyp und von den Eisenverlusten abhängig. Der Phasenstrom ist gegenüber dem Erregerfeld phasenverschoben. Um den Zusammenhang zu kennen muß der Motor auf einem Prüfstand eingemessen werden.
- Die Gegen-EMK wird gemäß den Gesetzen der Induktion erzeugt. Der Augenblickswert ist (ohne jede Phasenverschiebung) von der aktuellen Rotorposition abhängig. Die Amplitude der Gegen-EMK steigt mit zunehmender Rotordrehzahl. Die Gegen-EMK ist unabhängig von weiteren Parametern.

- Der Lastwinkel ist ein Maß für das abgegebene Drehmoment. Der sinnvoll mögliche Lastwinkel liegt unabhängig vom Motortyp und anderen Parametern immer zwischen 0° und 90° (-90° bei Bremsvorgängen).

=> Der Lastwinkel ist ein präzises Maß für das abgegebene Drehmoment. Der Lastwinkel soll gemessen werden.

Mögen die Spiele beginnen

Bei den üblichen - für Hobbyisten erhältlichen - SM ist keine Hilfswicklung verfügbar. Anhand dieser wäre die Messung der induzierten Wechselspannung ohne besonderen Aufwand und unabhängig von der Erregersequenz möglich. Stattdessen muß die Gegen-EMK über die vorhandenen Wicklungen meßbar sein. Das soll ohne Rückwirkungen auf die normale SM-Funktion geschehen.

Für die folgenden Experimente wird der SM nicht mit der üblichen „2-Phasen-bestromt“ Vollschriff-Sequenz angesteuert. Die wird auch als „Fulldrive-Fullstep“ bezeichnet. Die etwas unbekanntere „1-Phase-bestromt“ Vollschriff-Sequenz (sog. „Wavedrive“) dreht den Motor ebenso korrekt, die jeweils unbestromte Wicklung wird dann zur Messung der Gegen-EMK herangezogen. Das erzielte Drehmoment liegt dann mindestens bei 71% der üblichen Sequenz mit Strom in zwei Phasen. Einige SM [1] sind sogar für diesen Betriebsfall ausgelegt und wegen der Sättigungserscheinungen im Magnetkreis bringt die gleichzeitige Bestromung beider Phasen bei diesen Typen nicht die theoretischen 29% Drehmomentzuwachs!

Anmerkung: Gemäß [1] besteht die Möglichkeit bei Choppertreibern oder linear arbeitenden Konstantstromtreibern die Gegen-EMK auch aus der bestromten Wicklung zu ermitteln. Der lineare Konstantstromtreiber verbietet sich wegen seines geringen Wirkungsgrades bei Akkubetrieb. Ein Choppertreiber ist nicht verfügbar. Zu hohe Chopperfrequenzen können ebenfalls einen erhöhten Verlust nach sich ziehen (Wirbelstromverluste im Statorkreis).

Der Versuchsaufbau verwendet einen L293E zur Ansteuerung des SM. Es stehen 7,5V aus einem stabilisierten Netzgerät für die Brücken zur Verfügung. Die Freilaufdioden sind vom Typ 1N4004.

Der SM hat die Daten

2-Phasen-bipolar; $R_{Ph}=31\Omega$; $L_{Ph}=18,2mH$; 20FS/rev; weitere Daten unbekannt

Der Abbildungsmaßstab der Oszillogramme ist

hor.: 2ms/Div

vert.: 1V/Div

Die 0V-Linie ist in etwa identisch mit der untersten horizontalen Schirmlinie. Abgebildet ist jeweils die Spannung der beiden Wicklungsenden einer Phase. Im folgenden werden sowohl die Begriffe Wicklung und Phase gebraucht. Sie bezeichnen immer eine Wicklung des bipolaren SM.

Schrittmotor im Leerlauf (Abbildung 1)

Im Bereich zwischen der roten und der blauen Hilfslinie wird die Wicklung bestromt. Es ist zu erkennen, daß etwa $6,6V - 1,4V = 5,2V$ an der Wicklung stehen. Davon ist dann noch die Gegen-EMK abzuziehen. Nach etwa 3ms endet die Bestromung (der 1. Schritt) und beide Seiten der Wicklung werden hochohmig geschaltet (blaue Hilfslinie). Aufgrund der Wicklungsinduktivität wird der vorher erreichte Phasenstrom in den Freilaufkreis gespeist. Ist das Magnetfeld und damit der Phasenstrom abgeklungen, sinkt die Phasenspannung bis auf den Wert der Gegen-EMK ab (grüne Hilfslinie). Siehe auch Abbildung 3 zum Thema Schaltverhalten der 1N4004. Bis zur gelben Hilfslinie entspricht die Phasenspannung der momentanen Rotorposition. Ab der gelben Hilfslinie wird Schritt 3 kommutiert. Dazu wird die gleiche Phase umgekehrt bestromt, die Verhältnisse bleiben jedoch gleich – die Symmetrie ist sehr gut zu erkennen. Danach folgt dann wieder die nächste Pause und schließlich beginnt der Zyklus erneut.

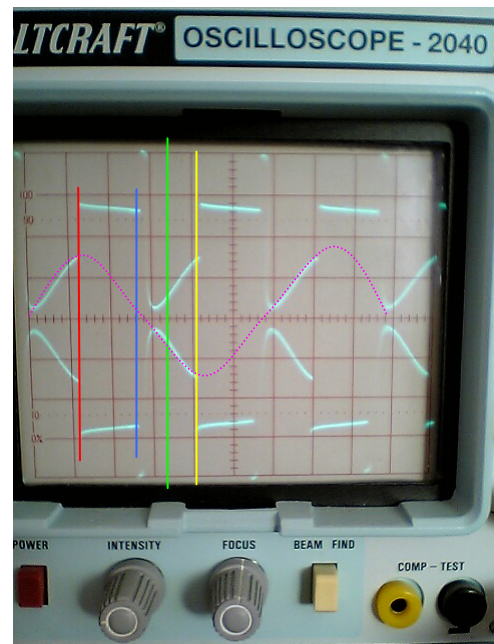


Abbildung 1 – SM im Leerlauf

Der Momentanwert der Gegen-EMK an der gelben Markierung liegt bei etwa $5,5V - 2,5V = 3V$. Es ist zu erkennen, daß die Steilheit der Kurven bereits abnimmt. Zum Vergleich ist der geschätzte Spannungsverlauf eines Wicklungsendes angegeben (pink). Der Kontrast ist bewusst gering gehalten.

Schrittmotor belastet (Abbildung 2)

Ein Wort vorweg: Die Belastung wurde hier durch Abbremsen der Motorwelle von Hand erzeugt. Das ist daher weder exakt reproduzierbar noch konstant. Immerhin kann man die veränderte Phasenlage der Gegen-EMK gut erkennen.

Analog zu Abbildung 1 ist diesmal der Spannungsverlauf dargestellt wenn der Motor unter einer mittleren Belastung läuft. Die Ansteuerung ist unverändert um die Ergebnisse vergleichen zu können. Trotz der Unschärfe ist der Unterschied im Signalverlauf deutlich zu erkennen. Da der Rotor nun weiter hinter dem Erregerfeld zurückbleibt, ist die Sinusfunktion der Gegen-EMK nach rechts verschoben. Dadurch wird nun der Nulldurchgang der Gegen-EMK (der Kreuzungspunkt zwischen „Fischkörper“ und „Fischflosse“) gut sichtbar. Bei einem idealen leerlaufenden SM liegt der Nulldurchgang exakt am Ende der Bestromungszeit (blaue Hilfslinie). In Abbildung 1 ist er bereits etwas nach rechts verschoben, aber wegen der Unzulänglichkeiten der 1N4004 ist das nicht zu

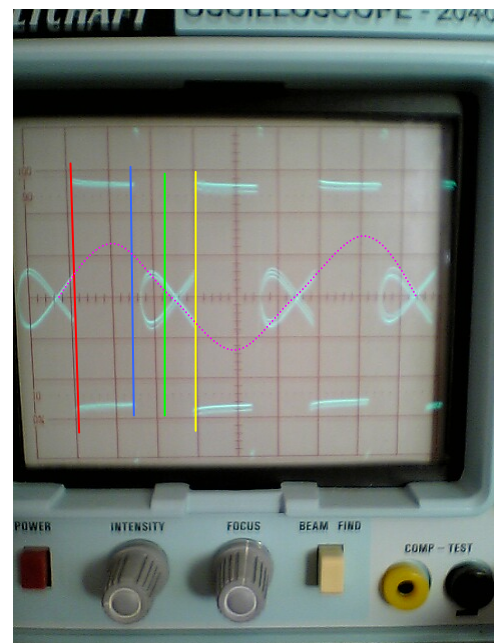


Abbildung 2 – SM belastet

erkennen. Im hier gezeigten Lastfall kann man abschätzen, daß der Rotor um etwa 2ms gegenüber der idealen Position nachläuft. Das ergibt den Lastwinkel:

1 Schritt = 90° elektr. Winkel $\cong$ 3ms

=> 2ms $\cong$ 60° elektr. Winkel

Und damit:

$\sin(60^\circ) = 86,6\%$ maximales Drehmoment

Der Momentanwert der Gegen-EMK an der gelben Markierung liegt hier bei etwa 4,5V-3,5V=1V.

Schrittmotor überlastet (Abbildung 3)

Analog zu Abbildung 1 ist diesmal der Spannungsverlauf dargestellt wenn der Rotor trotz Erregung nicht dreht. Die e-Funktion im Bereich zwischen blauer und grüner Hilfslinie rührt von der Sperrerholzeit der 1N4004-Dioden. Diese sind für die Anwendung also nicht geeignet – aber das war zu erwarten. Selbstverständlich kommt der Effekt auch unter den vorhergehenden Betriebsbedingungen zu Stande, ist dort aber nicht ganz so offensichtlich.

Besonders ist hier auf die deutlich längere Zeit für den Abbau des Wicklungsstromes während der unbestromten Phase zu erwähnen (ab der blauen Hilfslinie bis zum Einsatz der e-Funktion). Das rührt natürlich von der höheren Stromaufnahme der Wicklung her. Da diesmal die Gegen-EMK fehlt, bleiben für die Wicklung etwa 6,6V-1,4V=5,2V ohne weiteren Abzug übrig.

Der Momentanwert der Gegen-EMK an der gelben Markierung liegt diesmal bei 4,4V-3,6V=0,8V.

Theoretisch sollten 0V anliegen, da der Rotor ja nicht dreht. Tatsächlich aber zittert der Rotor bei jedem kommutierten Schritt, das ist Rotorbewegung, die EMK induziert. Wegen der zu hohen Schrittrate kann er jedoch nicht schnell genug hochlaufen und ins Drehfeld einrasten. Außerdem sind auch noch Reste der Induktionsvorgänge der zweiten Phase vorhanden, die nie 100%ig unterdrückt werden können.

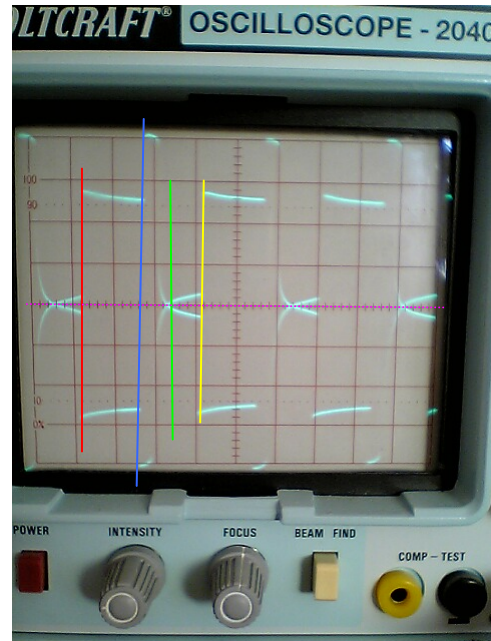


Abbildung 3 – SM überlastet (Rotor steht)

Schrittmotor bei höherer Schrittrate (Abbildung 4)

Abbildung 4 zeigt zu Vergleichszwecken den unbelasteten SM mit einer höheren Schrittrate (2ms/Step). Der Vergleich mit Abbildung 1 und Abbildung 2 wird wärmstens empfohlen.

Der Rotor erreicht nun eine höhere Drehzahl, somit ist die Amplitude der Gegen-EMK höher. Um nun den gleichen Leerlaufstrom aufzunehmen, muß der Lastwinkel natürlich größer sein, als bei der niedrigeren Schrittrate der Abbildung 1. Auch das „Fischlein“ aus Abbildung 2 sieht nun etwas anders aus – der „Körper“ ist „höher“, das liegt an der höheren Gegen-EMK und „kürzer“, das liegt an der höheren Schrittrate; die „Flosse“ ist kleiner, der Lastwinkel hat zugenommen.

In Zahlen macht das für den Lastwinkel:

1 Schritt = 90° elektr. Winkel $\cong$ 2ms

=> 1,6ms $\cong$ 72° elektr. Winkel

Und damit:

$\sin(72^\circ) = 95,1\%$ maximales Drehmoment

Der maximal mögliche Lastwinkel (90°) ist erreicht, wenn der Nulldurchgang der Gegen-EMK mit dem Beginn des nächsten Schrittes zusammenfällt. Wächst der Lastwinkel noch weiter an, dann sinkt das maximale Drehmoment wieder ab und der Rotor verliert die Synchronität. Es droht Schritterverlust, meist bleibt der SM stehen.

Der grob geschätzte Spannungsverlauf der Gegen-EMK (pink) ist angegeben. By the way: Wenn die Versorgungsspannung des Treibers erhöht wird, schiebt sich der Nulldurchgang wieder nach links. Der Rotor benötigt nun einen geringeren Lastwinkel um den erforderlichen Wicklungsstrom aufzubringen. Dieser Betriebsfall ist nicht explizit dargestellt, wurde jedoch ausprobiert.

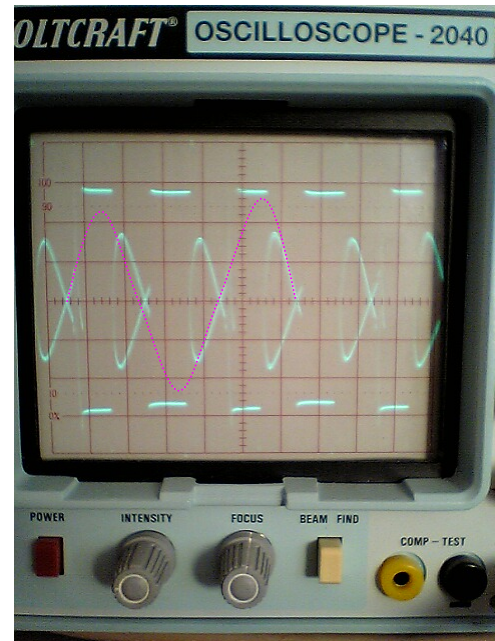


Abbildung 4 – SM im Leerlauf bei höherer Schrittrate

Ergebnis

Es ist möglich die mechanische Belastung eines Schrittmotors durch Überwachen der Gegen-EMK in einer unbestromten Wicklung (oder einer dafür eingebauten Hilfswicklung) zu messen. Es ist Aufgabe des Treibers diese Information auszuwerten und für weitere Funktionen zugänglich zu machen. Die Aussage „maximales Drehmoment erreicht“ ist unabhängig vom Typ des SM und anderen Parametern zu erhalten. Ohne das tatsächliche Drehmoment (Nm) des SM zu kennen, liegt sofort die relative Angabe in Prozent vor. Es gibt eine minimale Drehzahl unterhalb der die Auswertung der Gegen-EMK nicht erfolgen kann. Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Amplitude der Gegen-EMK ist linear. Im Bedarfsfall kann er einfach ermittelt werden.

Die Freilaufdioden müssen „Fast Recovery“ Typen sein; die verwendeten 1N4004 sind ungeeignet – selbst für PWM an DC-Motoren! Bei den Leistungstransistoren ist auf geringstmögliche Schaltzeiten zu achten (L293 ist an sich geeignet). Die Auswertung der Gegen-EMK darf erst erfolgen, wenn der Freilaufstrom durch die Wicklung auf 0 abgesunken ist.

Ausblick

Durch die Belastungsmessung kann bei Anlauf oder Abbremsen des SM die Kommutierung des jeweils nächsten Schrittes zum optimalen Zeitpunkt (für Lastwinkel = 90°) erfolgen. Dieser Zeitpunkt basiert dabei nicht auf voraussagenden Berechnungen anhand bekannter Lastbedingungen (solche Beispiele sind in [1, Kapitel 5] beschrieben). Der Kommutierungszeitpunkt wird hingegen aus der Rotorposition direkt abgeleitet und liegt daher unter unbekannten Lastbedingungen immer optimal. Weiterhin kann die Bestromungszeit der Wicklung den Erfordernissen angepasst werden um einen ruhigeren Motorlauf durch weniger Drehmomentüberschuß zu erhalten.

Literatur

- 1 Schrittmotor-Antriebe, Friedrich Prautzsch, Franzis Verlag 1988
- 2 Elektromotoren im Modellbau, Christian Jäkel, Franzis Verlag 1986