Regelung einer Gleichstrommaschine

Alexander Murray
alexander.murray@students.fhnw.ch

Remo Suter
remo.suter@students.fhnw.ch

23. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

Für viele Applikationen ist das genaue Regeln der Drehzahl eines Motors wichtig, unabhängig von der Last. Beispiele sind Lokomotiven, Autos, CNC Maschinen, Generatoren und so weiter. Eine Lokomotive sollte nicht langsamer bergauf fahren, ein Fräser sollte nicht bei dichteren Materialien langsamer fräsen und die Netzfrequenz eines elektrischen Generators sollte nicht abnehmen, wenn mehr Geräte Strom konsumieren.

Die Lösung dieses Problems liegt in der Regelungstechnik. Der Motor kann in ein Regelkreis gesetzt werden und von einem Regler gespiesen werden, welcher die *Ist*-Drehzahl mit einer *Soll*-Drehzahl vergleicht.

In dieser Arbeit wird ein solches System mit Hilfe von *Simscape* und *Simulink* modelliert, simuliert, und optimiert.

2 Theorie

Die Theorie von Gleichstrommotoren und von Regelkreisen wird ein wenig erläutert. Es wird nicht in die Mathematik der Regeltechnik eingegangen, weil wir uns in diesem Bericht nicht direkt damit befassen.

2.1 Gleichstrommaschine

Die Steuerung wird mit einer Gleichstrommaschine Realisiert. Dafür wird das Ersatzschaltbild in der Abbildung 1 verwendet.

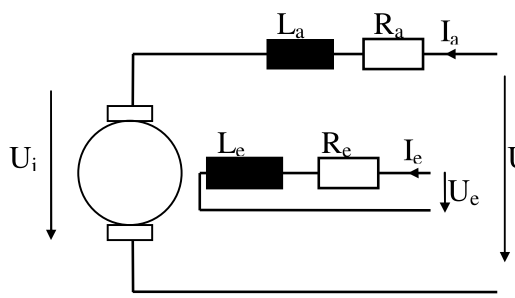

Abbildung 1: Ersatzschaltung der Gleichstrommaschine. Die eingezeichneten Strom- und Spannungsrichtungen entsprechen dem Verbrauchersystem.

Die relevanten Gleichungen für die elektrische Domäne sind:

$$U_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + U_i \tag{2.1}$$

$$U_e = R_e \cdot i_e + L_e \cdot \frac{di_e}{dt} \tag{2.2}$$

In der Mechanischen Domäne:

$$M_{el} = M_{Welle} + M_R + J\frac{d\omega_m}{dt} \tag{2.3}$$

Die elektrische und mechanische Domänen sind nach dem folgenden Gesetz gekoppelt:

$$U_i = c\phi\omega_m \tag{2.4}$$

$$M_{el} = c\phi I_a \tag{2.5}$$

Die Gleichstrommaschine kann in verschiedene Arten geschalten werden (Fremderregt, Nebenschluss und Hauptschluss). Wir verwenden die fremderregte Schaltungsart, aus dem Grund, weil so die Drehzahl *linear* mit der Belastung abnimmt und alles was sich linear verhält ist in der Regelungstechnik bevorzugt und einfacher zu steuern.

Für diese Schaltungsart wird der Erregerkreis unabhängig vom Ankerkreis gespeist. So kann der Erregerfluss unabhängig vom Ankerstrom eingestellt werden. Es gilt:

$$U_a = U_i + R_a I_a = c\phi_e\omega_m + R_a I_a \tag{2.6}$$

ϕ_e bleibt konstant sofern I_e auch konstant bleibt.

2.2 Regelkreis

Ein Regelkreis besteht hauptsächlich aus einem *Regler* (C) und einer Regelstreck (engl. *Plant*) (P) (siehe Abbildung 2).

Eine unbekannte Störgrösse (engl. *Disturbance*) wirkt auf die Regelstrecke, welches durch die Steuerung kompensiert werden muss. In unserem Fall ist die Störgrösse das unbekannte Lastmoment, das auf den Rotor wirkt.

In der Rückkopplung befindet sich weiter die Messung des *Ist*-Werts, in unserem Fall ist das die Umwandlung einer Drehzahl in eine Spannung.

Der *Ist*-Wert wird mit dem *Soll*-Wert am Eingang des Regelkreises verglichen und der Regler reagiert entsprechend.

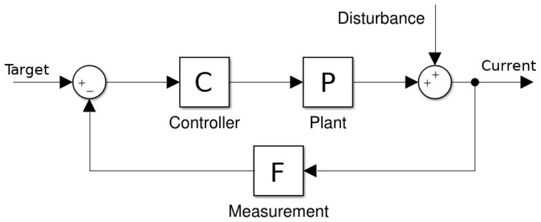

Abbildung 2: Aufbau eines geschlossenen Regelkreises

3 Simulationen

Die Gleichstrommaschine wird wie in der Theorie in Simscape modelliert (siehe Abbildung 3).

Die Gleichstrommaschine hat eine maximale Drehzahl von 1000 U/min bei einer maximalen Spannung von 12 V.

In der elektrischen Domäne befindet sich der Ankerwiderstand R_a und die Ankerspule L_a. Der elektrische Strom wird in eine mechanische Rotation umgesetzt. Die Rotation besitzt natürlich ein Trägheitsmoment (engl. *Inertia*) wegen der Masse des Rotors und wird weiter leicht gedämpft (engl. *Rotational Damper*) weil der Rotor nicht reibungsfrei ist.

Die physikalischen Grössen, die für die Simulation gewählt wurden, sind:

Name	Zeichen	Grösse
Ankerwiderstand	R_a	$1\,\Omega$
Ankerinduktivität	L_a	$0.5\,\mathrm{H}$
Umsetzungskonstante	$c\phi$	$0.1\,\mathrm{V}/(\mathrm{rad/s})$
Trägheitsmoment	J	$0.01\,\mathrm{kg\,m^2}$
Dämpfungsmoment	M	$0.001\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad/s})$

Tabelle 1

Die Gleichstrommaschine ist modelliert. Eine erste Simulation wurde durchgeführt, um die Schrittantwort des Motors zu messen. Diese ist in der Abbildung 4 zu sehen. Wir sehen, dass bei 12 V Eingangsspannung tatsächlich die 1000 U/min, oder $109.1\,\mathrm{rad\,s^{-1}}$ erreicht werden.

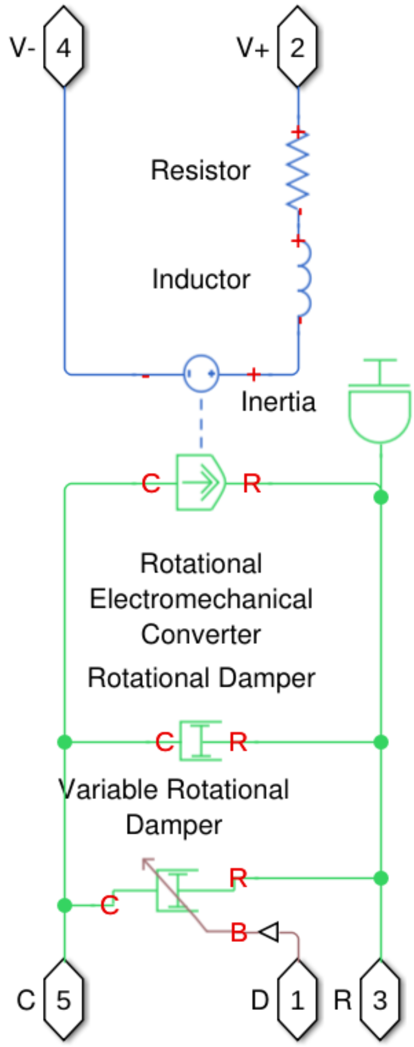

Abbildung 3: Simscape Modell der Gleichstrommaschine

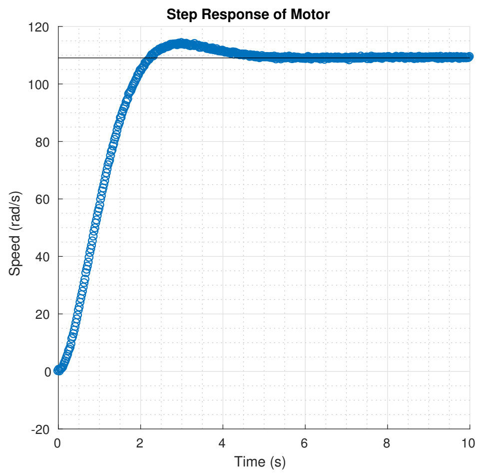

Abbildung 4: Schrittantwort der Gleichstrommaschine mit 12 V Eingangsspannung. Die Drehzahl erreicht 1041 U/min, oder $109.1\,\mathrm{rad\,s^{-1}}$

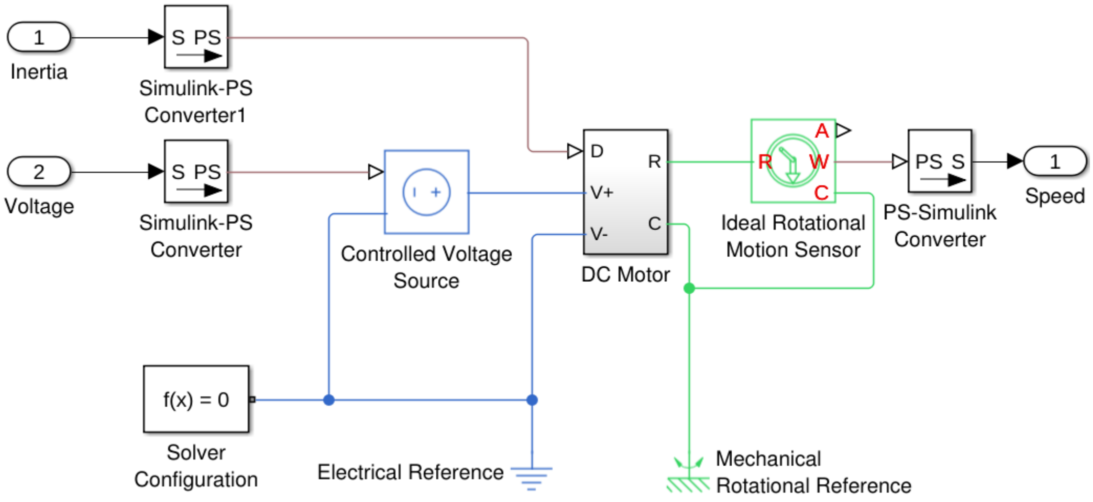

Abbildung 5: Simscape Modell der Regelstrecke

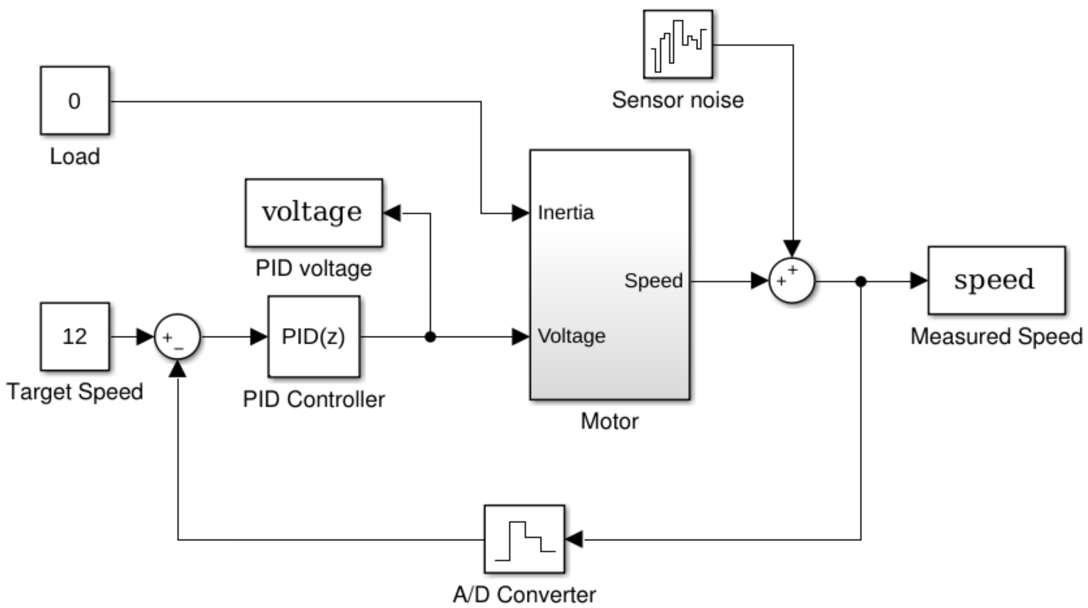

Abbildung 6: Modell des gesammten Systems.

Um den Regelkreis implementieren zu können müssen die Relevanten Grössen gemessen bzw. eingestellt werden können. In der Abbildung 5 ist dieser Aufbau zu sehen.

Die Speisespannung des Motors wird mit einer variablen Spannungsquelle von Simulink aus gesteuert. Die Last am dem Rotor wird auch von Simulink aus gesteuert.

Die Drehgeschwindigkeit wird mit einem idealen Drehsensor gemessen und in $\mathrm{rad\,s^{-1}}$ an Simulink weitergeleitet.

In der Abbildung 6 ist das Gesamtsystem zu sehen.

Um ein bisschen mehr realitätsnah zu sein, wird Rauschen auf die gemessene Drehgeschwindigkeit addiert.

Die gemessene Drehgeschwindigkeit wird zuerst in den Bereich $[0\,\mathrm{V}..12\,\mathrm{V}$ angepasst, indem die Drehgeschwindigkeit mit einer Konstante von 0.115 multipliziert wird. Danach wird sie mit einer Periodendauer von $20\,\mathrm{ms}$ “abgetastet” um das Verhalten eines digitalen Reglers zu simulieren. Die Annahme hier ist, dass der Regler mit einem Mikrocontroller implementiert wird (sehr wahrscheinlich heutzutage).

Für den Regler verwenden wir den von Simulink zur Verfügung gestellten *PID Controller* Block. Davon gibt es eine zeit-kontinuierliche und zeit-diskrete Version. Wir verwenden die letztere und setzen auch hier die Abtastperiode auf $20\,\mathrm{ms}$.

Lässt man die Standardeinstellungen des PID-Reglers und simuliert das System, so entsteht – wie erwartet – nichts optimales (siehe Abbildung 7).

Die grösste Einschränkung für den Regler ist die maximale Eingangsspannung des Motors, der zwischen $0\,\mathrm{V}$ und $12\,\mathrm{V}$ bleiben muss. Das heisst dass die Schrittantwort des Systems so schnell wie möglich sein sollte, aber nicht so schnell dass diese maximale Spannung überschritten wird.

Um diese Aufgabe zu lösen stellt MATLAB ein PID-Tuning tool zur Verfügung. Insbesondere kann man die “Regleranstrengung” (engl. *Controller Effort*) plotten (siehe Abbildung 8), welches sagt, wie die Ausgangsspannung des Reglers verlaufen wird wenn am Eingang ein Schritt von $1\,\mathrm{V}$ angelegt wird.

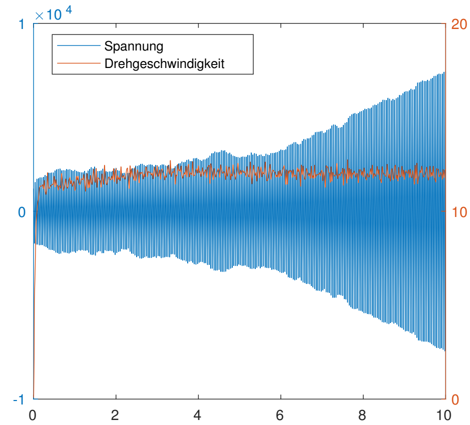

Abbildung 7: PID Regler mit Standardeinstellungen. Der Sollwert wird zwar sehr schnell erreicht, aber die Eingangsspannung des Motors schwankt um $10\,\mathrm{kV}$ was für ein $12\,\mathrm{V}$ Motor nicht optimal ist.

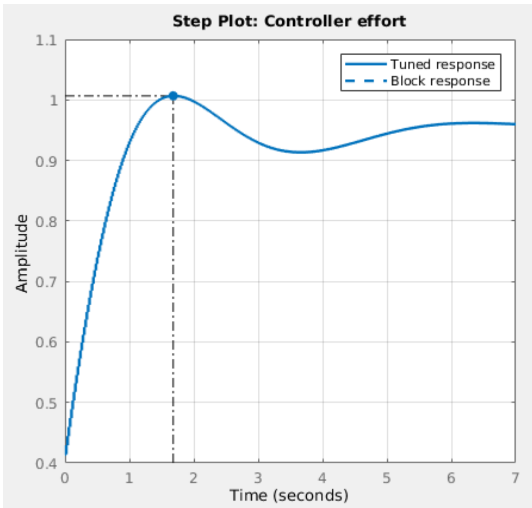

Abbildung 8: PID “Anstrengung” (engl. *Control Effort*) muss unter den Wert 1.0 bleiben, damit $12\,\mathrm{V}$ nicht überschritten wird.

Wenn die Reglerkonstanten also so eingestellt werden, dass der *Controller Effort* nie über den Wert 1.0 steigt, dann wird die Ausgangsspannung des Reglers nie über $12\,\mathrm{V}$ steigen.

4 Resultate

Es gibt ein paar interessante Simulationen, die durchgeführt werden können.

4.1 Unmöglicher Sollwert

Wie bereits in der Theorie erläutert, nimmt die Drehzahl des Motors linear mit dem Lastmoment ab. Das heisst also, dass der Motor die maximale Drehzahl von 1000 U/min nur erreichen kann, wenn keine Last vorhanden ist.

Es wird eine Last von $0.005\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$ simuliert und der Sollwert wird auf 1000 U/min gesetzt.

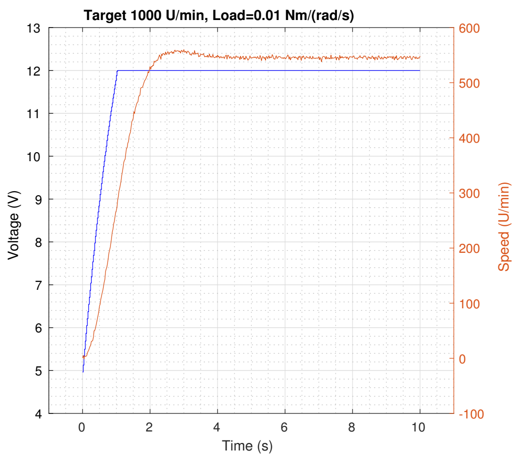

Abbildung 9: Verhalten bei einem Sollwert von 1000 U/min und einer Last von $0.01\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$. Es werden nur 545.3 U/min erreicht.

Wir sehen in der Abbildung 9 dass nur gerade 545.3 U/min erreicht werden, und die Eingangsspannung des Motors bleibt bei $12\,\mathrm{V}$ hängen (der PID-Regler wurde so eingestellt, dass die Ausgangsspannung limitiert wird).

4.2 Windup

Diese Spannungslimitierung (engl. *Clamping*) führt zu einer Nicht-Linearität im Regelkreis und es kann zu einem "Aufwickeln" (engl. *Windup*) führen. Dabei wird der Integralteil des PID-Reglers immer grösser und grösser, was zur Folge hat, dass bei der Entfernung der Störgrösse der Regler nicht sofort reagiert.

Dieses Verhalten ist gut in der Abbildung 10 zu sehen.

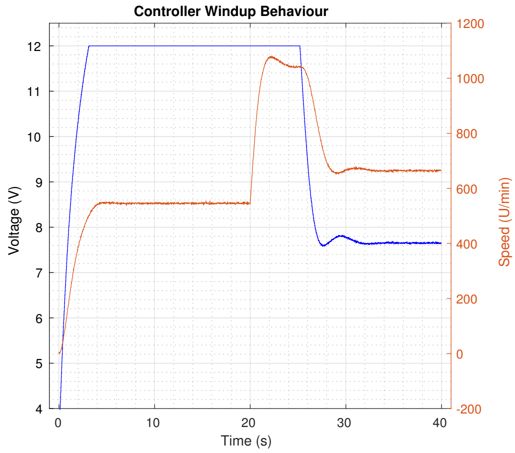

Abbildung 10: "*Windup*"-Verhalten des Reglers. Bei $t = 20\,\mathrm{s}$ wird die Last entfernt, aber die Spannung bleibt eine Zeit lang bei $12\,\mathrm{V}$ hängen.

Eine Lösung dazu ist den Integralteil zu limitieren. Die gleiche Simulation wird durchgeführt, aber diesmal ist der Integralteil auf $0\,\mathrm{V}$-$12\,\mathrm{V}$ limitiert.

Wir sehen ein viel besseres Verhalten in der Abbildung 11. Der Regler reagiert sofort auf die Laständerung und bleibt nicht mehr eine weile lang stecken.

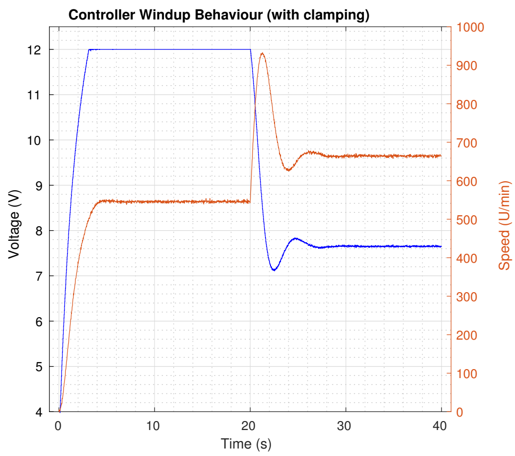

Abbildung 11: "*Windup*"-Verhalten des Reglers. Bei $t = 20\,\mathrm{s}$ wird die Last entfernt und der Regler reagiert sofort.

4.3 Lastabhängigkeit

Die Abbildung 12 zeigt die Schrittantwort des Systems mit einer Soll-Drehzahl von 500 U/min bei verschiedener Last. Die Läste sind von $0\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$ bis $0.01\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$ verteilt.

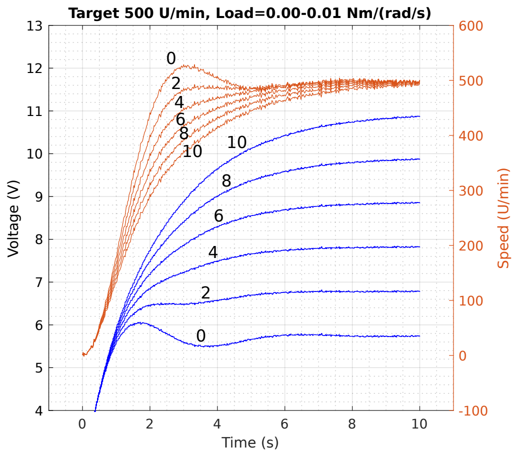

Abbildung 12: Verhalten bei einem Sollwert von 500 U/min und verschiedene Läste von 0 bis $0.01\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$. Der Sollwert wird erreicht, aber erst nach ca. $10\,\mathrm{s}$!

Wie erwartet, muss der Regler eine höhere Spannung erzeugen für zunehmende Last. Der Schritantwort hört bei einer Last von $> 0.003\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$ auf zu überschwingen. Je höher die Last, desto länger hat das System, den Sollwert zu erreichen.

4.4 Dynamisches Verhalten

Die Abbildung 13 zeigt das Verhalten des Systems, wenn eine Last plötzlich anfängt zu wirken, und nach einer Zeit wieder aufhöhrt zu wirken.

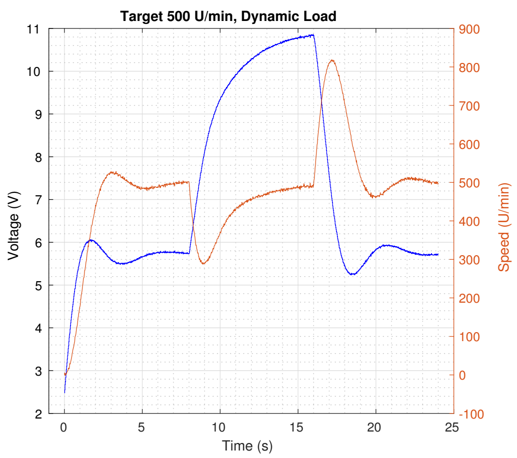

Abbildung 13: Verhalten bei einem Sollwert von 500 U/min und eine Last, die plötzlich bei $t = 8\,\mathrm{s}$ wirkt und bei $t = 16\,\mathrm{s}$ wieder entfernt wird. Die Last entspricht $0.01\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$

Die Last beträgt dabei $0.01\,\mathrm{Nm}/(\mathrm{rad}/\mathrm{s})$ und fängt bei $t = 8\,\mathrm{s}$ an zu wirken. Bei $t = 16\,\mathrm{s}$ wird die Last wieder entfernt.

Wir sehen, dass der Motor recht stark vom Sollwert schwankt (etwa um 300 U/min).

5 Diskussion

In diesem Bericht wurde ein ziemlich Leistungsschwacher Motor gewählt. Es hat schon etwa $5\,\mathrm{s}$-$10\,\mathrm{s}$ bis der Sollwert erreicht wird.

Die grössten limitierenden Faktoren sind das Übersetzungsverhältnis $c\phi$ und die Stromänderung durch den Ankerkreis (limitiert durch den Ankerwiderstand R_a und Ankerinduktivität L_a). Je grösser bzw. schneller diese Grössen sind, desto schneller kann die Regelung auch stattfinden.

Die $20\,\mathrm{ms}$ Abtastperiode lässt auch nicht unbedingt ein schnelles Regeln zu, aber für diese Simulation hat es gereicht.

Für leistungsstärkere Motoren würde man aber keine Gleichstrommaschine mehr nehmen, sondern man würde in Richtung Drehstrom-Synchronmaschine gehen. Diese werden anders betrieben und es wäre interessant, diese Simulationen nochmals durchzuführen aber mit modellierung der Brückenschaltungen.

Simscape, Simulink und MATLAB machen es unglaublich einfach, solche Systeme aufzubauen und zu testen. Die Theorie, die dahinter steckt, muss man dabei auch gar nicht verstehen (aber es hilft natürlich, wenn man es weiss).

Die Simulationsdaten und die Source-Files des Berichts können auf GitHub[1] heruntergeladen werden.

Literatur

[1] Alex Murray (TheComet93). *Simulation einer Gleichstrommaschine*. https://github.com/TheComet93/laborjournal/tree/master/versuche/sim. 2017.