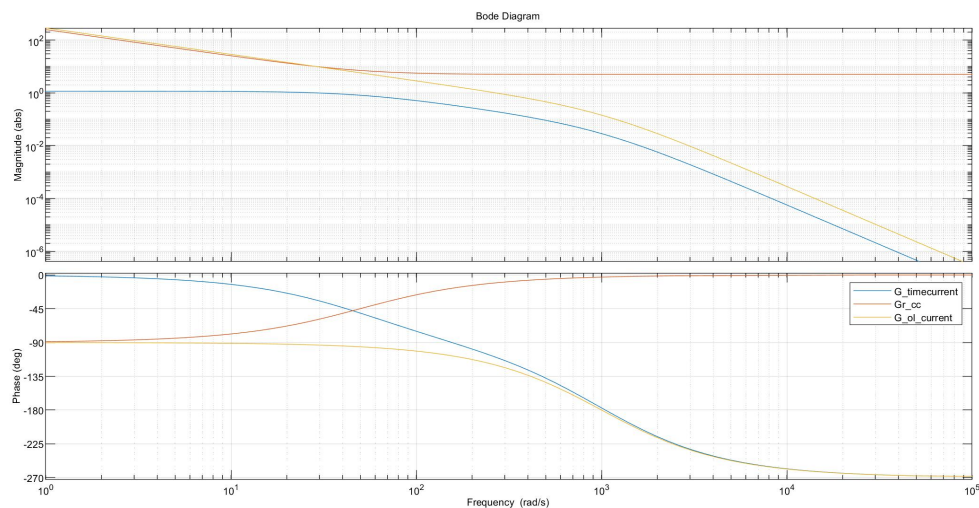


# Geberloser drehzahlvariabler Drehfeldmaschinen-Antrieb

## DOKUMENTATION REGELAUSLEGUNG

Windisch, 16. April 2020



Auftraggeber	Medium Voltage Drives, ABB Turgi (Vertreten durch Xinhua Ke)
Autoren	Fabian von Büren und Severin Weibel
Betreuerin	Dr. Xinhua Ke
Hochschule	Hochschule für Technik - FHNW
Studiengang	Elektro- und Informationstechnik
Version	1.0

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Dokumentation der Regelauslegung</b>	<b>1</b>
1.1	Maschinenparameter . . . . .	1
1.2	Stromregelkreis (unterlagert) . . . . .	2
1.2.1	ASM - Statorstrom in Funktion von Statorspannung: Gs . . . . .	2
1.2.2	Modulator Zeitverzögerung: Gf . . . . .	3
1.2.3	Identifizierte Strecke: G_timecurrent . . . . .	3
1.2.4	Stromregler Gr_cc . . . . .	3
1.2.5	Geschlossener Stromregel-Kreis: Gi . . . . .	5
1.3	Rotorfluss-Regelkreis . . . . .	5
1.3.1	ASM - Rotorfluss in Funktion von Statorstrom: G_flux . . . . .	6
1.3.2	Identifizierte Strecke: G_fluxcurrent . . . . .	6
1.3.3	Flussregler Gr_fc . . . . .	6
1.4	Drehzahl-Regelkreis . . . . .	8
1.4.1	ASM - Drehzahl in Funktion von Statorstrom: G_speed . . . . .	8
1.4.2	Identifizierte Strecke: G_speedcurrent . . . . .	9
1.4.3	Drehzahlregler Gr_wc . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Simulationsresultat</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Offene Pendenzen</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>14</b>
<b>A</b>	<b>Messungen Zeitverzögerung Modulator</b>	<b>15</b>

# 1 Dokumentation der Regelauslegung

**Durchgeführt von:** Fabian von Büren & Severin Weibel

**Datum:** 16. April 2020

Diese Dokumentation beschreibt das Vorgehen der Regelauslegung. Die rotorflussorientierte Drehzahlregelung umfasst insgesamt drei Regelkreise. Bei jedem Regelkreis wird ein PI-Regler verwendet. Das Ziel ist die Bestimmung der Proportionalverstärkung ( $k_p$ ) sowie die Integralverstärkung ( $k_i$ ). Begonnen wird mit dem unterlagerten Stromregelkreis. Die mathematische Beschreibung der ASM basiert auf dem Skript „Geregelte Antriebe“ [1]. Es wird ein linearer Regler ausgelegt.

## 1.1 Maschinenparameter

Folgende Maschine wird verwendet:

Hersteller	Siemens
Maschinentyp	Käfigläufer ASM
Maschinennummer	1LE1001-1CB03-4AA4
Nennspannung $U_N$ (50Hz, 60Hz)	$\Delta 400V, \Delta 460V$
Nennstrom $I_N$ (50Hz, 60Hz)	11.3A, 9.9A
Nennleistung $P_N$	5.5kW
$\cos\varphi$	0.8
Nennzahl $\omega_n$ (50Hz)	1465U/min

**Tabelle 1.1:** Nenndaten für die auszumessende ASM-Maschine

Folgende Maschinenparameter werden verwendet (ASM im Labor ausgemessen):

Rotorwiderstand $R_S$	2.6/3 $\Omega$
Hauptinduktivität $L_h$	359.9/3mH
Streuinduktivität Stator $L_{\sigma,S}$	54.23/2/3mH
Streuinduktivität Rotor $L_{\sigma,R}$	54.23/2/3mH
Statorwiderstand $R_R$	2.6/3 $\Omega$

**Tabelle 1.2:** Ergebnisse für die untersuchte ASM-Maschine (Faktor 3 aufgrund Stern-Dreieck-Umwandlung)

Folgende Variablen werden zur vereinfachten Darstellung verwendet:

$$L_S = L_{\sigma,S} + L_h \quad (1.1a)$$

$$L_R = L_{\sigma,R} + L_h \quad (1.1b)$$

$$L_\sigma^2 = L_S \cdot L_R - L_h^2 \quad (1.1c)$$

## 1.2 Stromregelkreis (unterlagert)

In der Abbildung 1.1 ist das Blockschaltbild mit den berücksichtigten Elementen dargestellt. Die Bezeichnungen der Übertragungsfunktionen stimmen mit dem Matlab-File überein. Zur Bestimmung der Regelparmeter muss die zu regelnde Strecke identifiziert werden.

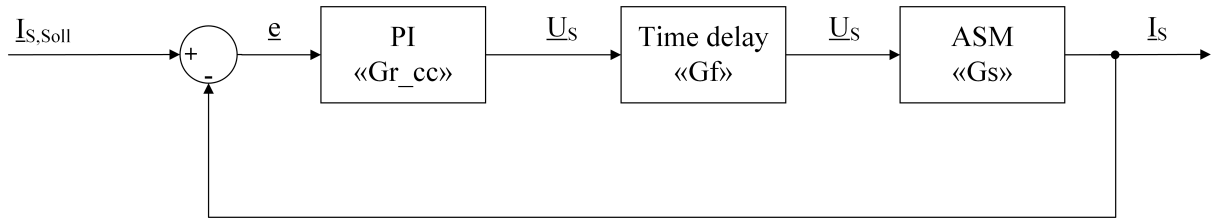


Abbildung 1.1: Blockdiagramm der unterlagerten Stromregelung

### 1.2.1 ASM - Statorstrom in Funktion von Statorspannung: G<sub>s</sub>

Die mathematische Beschreibung der ASM ist in den Gleichungen 1.2 und 1.3 ersichtlich. Für die lineare Reglerauslegung können jedoch Teile der Gleichungen vernachlässigt werden. Die beiden Gleichungen sind untereinander gekoppelt. Da die Entkoppelung am Reglerausgang vollzogen wird, können bei den Gleichungen 1.2 und 1.3 die beiden letzten Terme vernachlässigt werden. Weiter gilt, dass der Rotorflusszeiger auf die x-Achse gelegt wird, daraus folgt  $|\Psi_R| = \Psi_{R,x}$ .

$$u_{S,x} = R_S \cdot i_{S,x} + \frac{L_\sigma^2}{L_R} \cdot \frac{di_{S,x}}{dt} - \omega_K \cdot \frac{L_\sigma^2}{L_R} \cdot i_{S,y} - \frac{L_h}{L_R} \cdot \omega_K \cdot \Psi_{R,y} \quad (1.2)$$

$$u_{S,y} = R_S \cdot i_{S,y} + \frac{L_\sigma^2}{L_R} \cdot \frac{di_{S,y}}{dt} + \omega_K \cdot \frac{L_\sigma^2}{L_R} \cdot i_{S,x} - \frac{L_h}{L_R} \cdot \omega_K \cdot \Psi_{R,x} \quad (1.3)$$

Dadurch vereinfacht sich die Gleichung in eine Differentialgleichung erster Ordnung.

$$u_{S,x} = R_S \cdot i_{S,x} + \frac{L_\sigma^2}{L_R} \cdot \frac{di_{S,x}}{dt} \quad (1.4)$$

$$u_{S,y} = R_S \cdot i_{S,y} + \frac{L_\sigma^2}{L_R} \cdot \frac{di_{S,y}}{dt} \quad (1.5)$$

In den Frequenzbereich transformiert folgt die Übertragungsfunktion G<sub>s</sub>.

$$G_s = \frac{I_{S,x}}{U_{S,x}} = \frac{I_{S,y}}{U_{S,y}} = \frac{I_S}{U_S} = \frac{\frac{1}{R_S}}{1 + s \cdot \left( \frac{L_\sigma^2}{L_R \cdot R_S} \right)} \quad (1.6)$$

### 1.2.2 Modulator Zeitverzögerung: Gf

Der Modulator sowie die diskrete Programmbearbeitung werden durch eine Zeitverzögerung berücksichtigt. Die Zeitverzögerung zwischen dem Reglerausgang sowie der modulierten Statorspannung wurde in der Simulation gemessen und beträgt 1ms (siehe Anhang A.1). Die Zeitverzögerung kann als einfacher Tiefpass oder Allpass approximiert werden. In diesem Fall wurde der Allpass durch die Pade-Approximation gebildet. Die Pade-Approximation ist auf den Winkel  $\varphi = 120^\circ$  angepasst.

$$td = 1ms \quad (1.7)$$

$$\varphi = 120^\circ \quad (1.8)$$

$$T = \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \frac{td}{\varphi} \quad (1.9)$$

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion Gf:

$$Gf = \frac{1 - s \cdot T}{1 + s \cdot T} \quad (1.10)$$

### 1.2.3 Identifizierte Strecke: G\_timecurrent

Wie in Abbildung 1.1 zu sehen, können die beiden Übertragungsfunktionen Gf und Gs zusammengefasst werden.

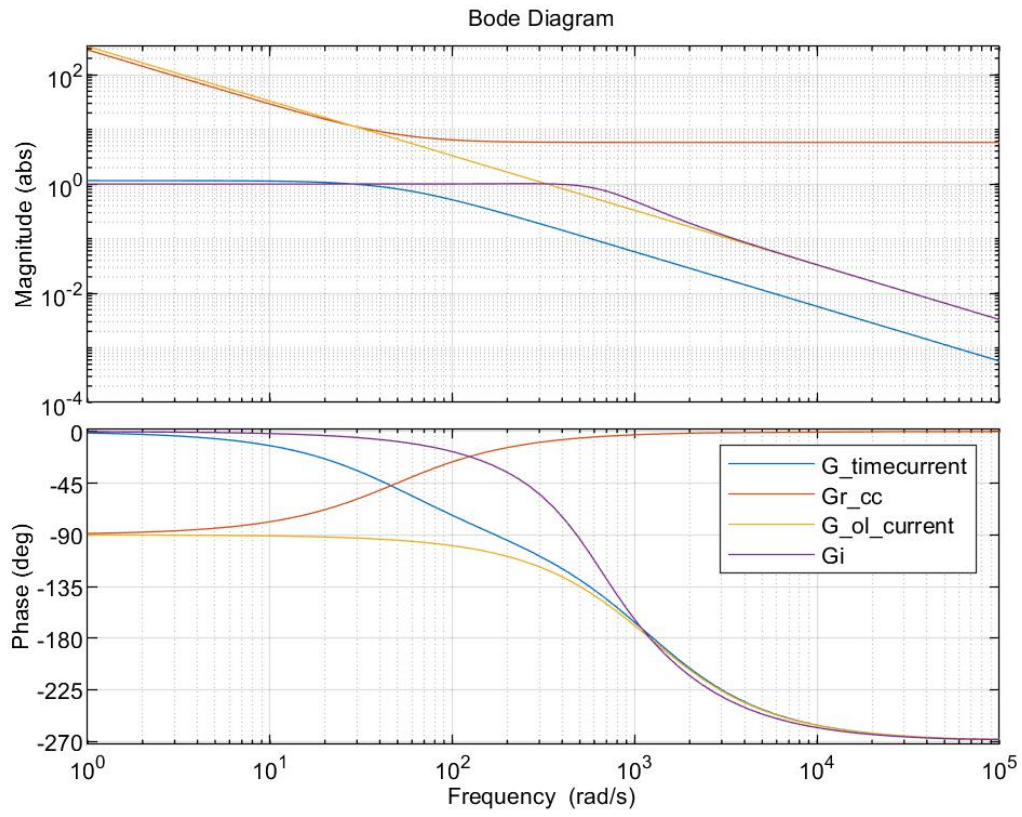
$$G\_timecurrent = Gs \cdot Gf \quad (1.11)$$

Anhand dieser Übertragungsfunktion wird nun der PI-Regler ausgelegt.

### 1.2.4 Stromregler Gr\_cc

Der offene Regelkreis (ohne Regler) ist  $F_0(j\omega) = Gs \cdot Gf = G\_timecurrent$  und ist somit die zu regelnde Strecke. Die Strecke hat einen stationären Endwert, so müssen die Bode Sätze 1, 2 und 3 erfüllt sein. (Anleitung gemäss [2, S. 45]). Die Übertragungsfunktionen sind im Bodeplot 1.2 abgebildet.

1. Die Eckfrequenz beträgt  $\frac{1}{T_N} = \frac{L_R \cdot R_S}{L_\sigma^2}$ . Die Integralverstärkung des Reglers ist somit  $ki\_cc = \frac{1}{T_N} = \frac{L_R \cdot R_S}{L_\sigma^2}$ .
2. Die Proportionalverstärkung kp\_cc beträgt 5.75. Somit ist die Verstärkung des Amplitudengangs bei  $\omega_D = 330 \frac{rad}{s}$  Eins.



**Abbildung 1.2:** Bodediagramm der zu regelnde Strecke  $G_{timecurrent}$

In Abbildung 1.3 ist die offene Regelstrecke  $G_{ol\_current} = Gr_{cc} \cdot G_{timecurrent}$  im Bodeplot abgebildet. Bei  $kp_{cc} = 5.75$  und  $ki_{cc} = \frac{L_R \cdot R_S}{L_\sigma^2} = 49.7$  beträgt die Phasenreserve 59.5 deg und die Amplitudenreserve 11.3 dB.

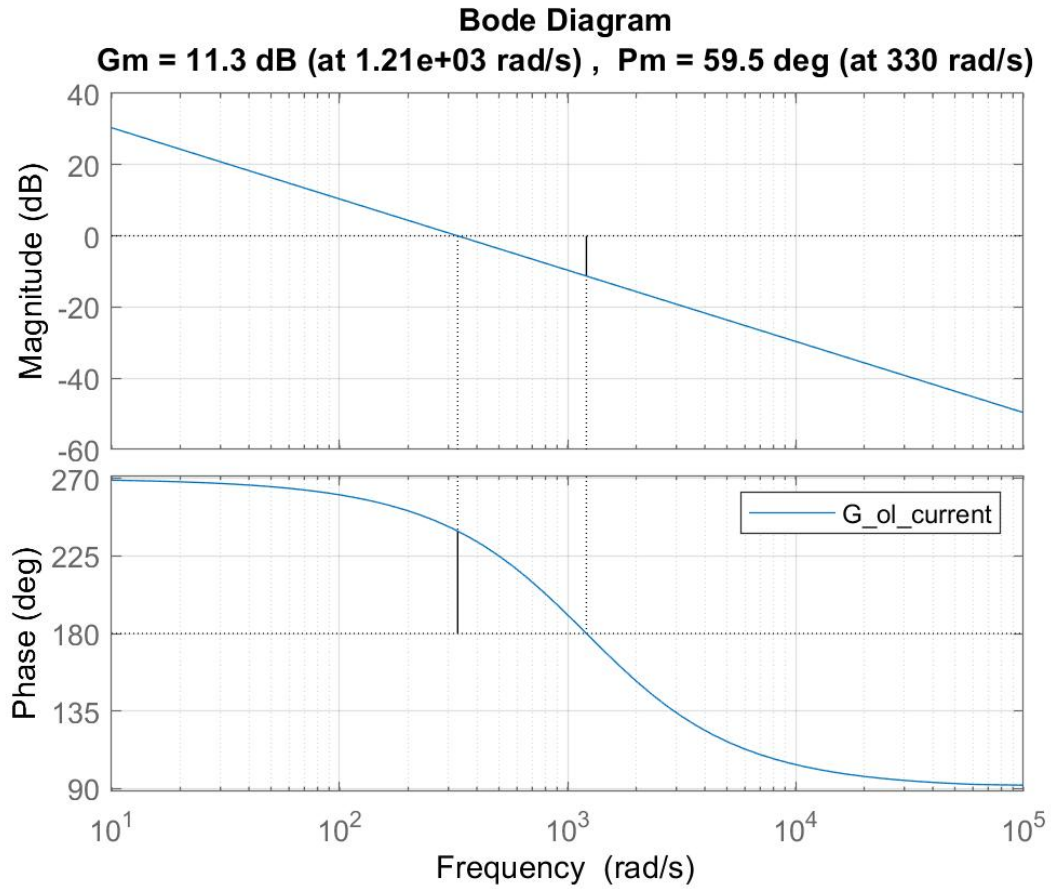


Abbildung 1.3: Bodediagramm des offenen Strom-Regelkreises

### 1.2.5 Geschlossener Stromregel-Kreis: $G_i$

Da es sich um eine Kaskaden-Regelung handelt, muss der offene Reglerkreis in einen geschlossenen Regelkreis gewandelt werden.

$$G_i = \frac{G_{ol\_current}}{1 + G_{ol\_current}} \quad (1.12)$$

In Matlab kann diese Rechnung mit dem Befehl  $G_i = \text{feedback}(G_{ol\_current}, 1)$  durchgeführt werden. Der geschlossene Regelkreis beträgt somit:

$$G_i = \frac{-0.0001104s^2 + 0.128s + 6.635}{3.35e-07s^3 + 0.0003113s^2 + 0.1482s + 6.635} \quad (1.13)$$

Diese Übertragungsfunktion ist auch in Abbildung 1.2 abgebildet. Die Übertragungsfunktion  $G_i$  wird in den überlagerten Regelkreisen verwendet.

## 1.3 Rotorfluss-Regelkreis

Nun folgt der Rotorfluss-Regler. Dieser Regelkreis ermittelt den Sollstrom  $i_{S,x,Soll}$ . In der Abbildung 1.4 ist das Blockschaltbild mit den berücksichtigten Elementen dargestellt. Die Bezeich-

nungen der Übertragungsfunktionen stimmen mit dem Matlab-File überein. Zur Bestimmung der Regelparameter muss die zu regelnde Strecke identifiziert werden.

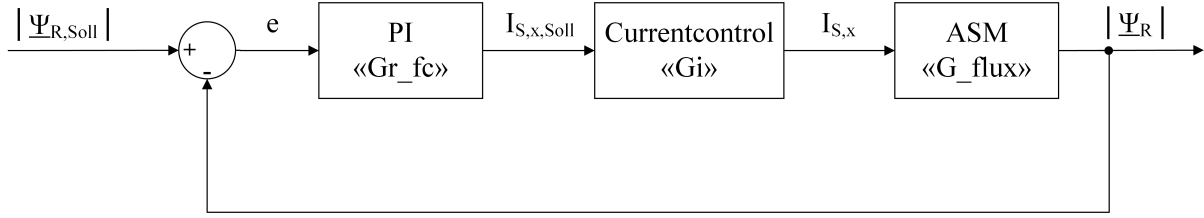


Abbildung 1.4: Blockdiagramm der Rotorfluss-Regelung

### 1.3.1 ASM - Rotorfluss in Funktion von Statorstrom: G\_flux

Die mathematische Beschreibung der ASM ist in den Gleichung 1.14 ersichtlich. Weiter gilt, dass der Rotorflusszeiger auf die x-Achse gelegt wird, daraus folgt  $|\Psi_R| = \Psi_{R,x}$ . Die Gleichung ist eine Differentialgleichung erster Ordnung.

$$i_{S,x} = \Psi_{R,x} \cdot \frac{1}{L_h} + \frac{\tau_R}{L_h} \cdot \frac{d\Psi_{R,x}}{dt} \quad (1.14)$$

$$\tau_R = \frac{L_R}{R_R} \quad (1.15)$$

In den Frequenzbereich transformiert folgt die Übertragungsfunktion G\_flux.

$$G_{flux} = \frac{\Psi_{R,x}}{I_{S,x}} = \frac{L_h}{1 + s \cdot \tau_R} \quad (1.16)$$

### 1.3.2 Identifizierte Strecke: G\_fluxcurrent

Wie in Abbildung 1.4 zu sehen, können die beiden Übertragungsfunktionen Gi und G\_flux zusammengefasst werden.

$$G_{fluxcurrent} = Gi \cdot G_{flux} \quad (1.17)$$

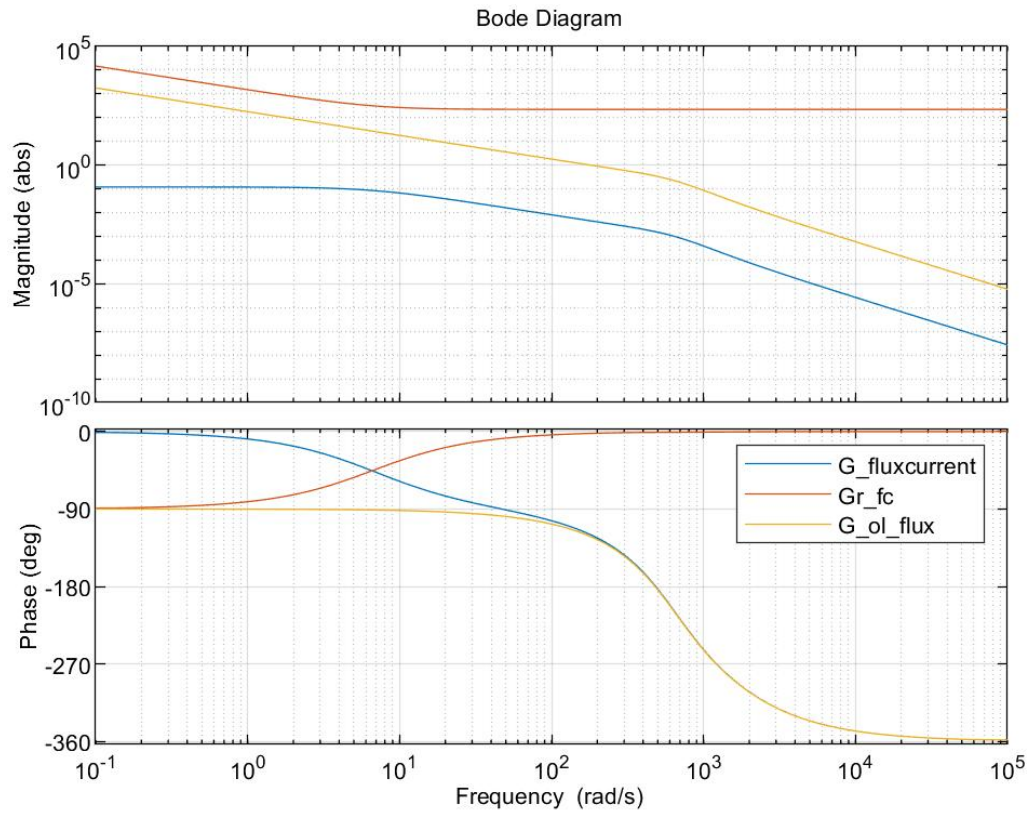
Anhand dieser Übertragungsfunktion wird nun der PI-Regler ausgelegt.

### 1.3.3 Flussregler Gr\_fc

Der offene Regelkreis (ohne Regler) ist  $F_0(j\omega) = Gi \cdot G_{flux} = G_{fluxcurrent}$  und ist somit die zu regelnde Strecke. Die Strecke hat einen stationären Endwert, so müssen die Bode Sätze 1, 2 und 3 erfüllt sein. (Anleitung gemäss [2, S. 45]). Die Übertragungsfunktionen sind im Bodeplot 1.5 abgebildet.

1. Die Eckfrequenz beträgt  $\frac{1}{\tau_R} = \frac{R_R}{L_R}$ . Die Integralverstärkung des Reglers ist somit  $ki_{fc} = \frac{1}{\tau_R} = \frac{R_R}{L_R}$ .
2. Die Proportionalverstärkung  $kp_{fc}$  beträgt 222.22. Somit ist die Verstärkung des Amplitudengangs bei  $\omega_D = 181 \frac{rad}{s}$  Eins.





**Abbildung 1.5:** Bodediagramm der zu regelnde Strecke  $G_{fluxcurrent}$

In Abbildung 1.6 ist die offene Regelstrecke  $G_{ol\_flux} = Gr_{fc} \cdot G_{fluxcurrent}$  im Bodeplot abgebildet. Bei  $kp_{fc} = 222.22$  und  $ki_{fc} = \frac{R_R}{L_R} = 6.72$  beträgt die Phasenreserve 58 deg und die Amplitudenreserve 9.07 dB.

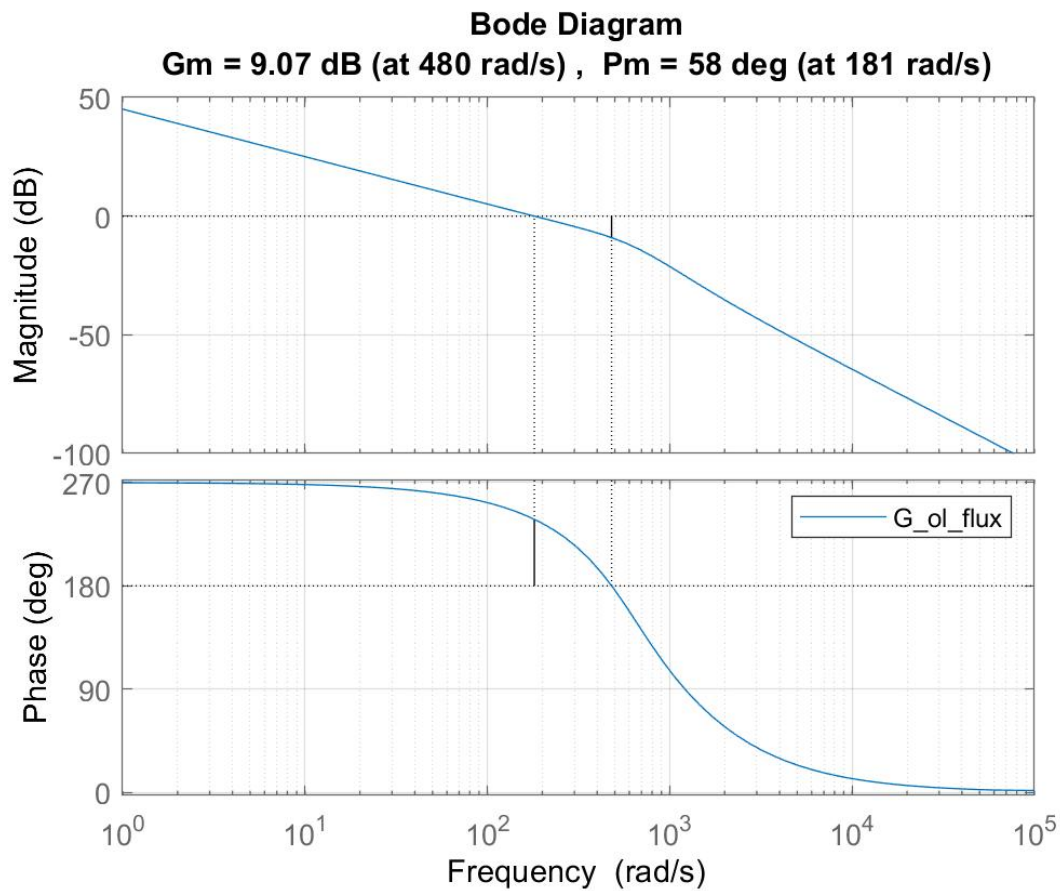


Abbildung 1.6: Bodediagramm des offenen Rotorfluss-Regelkreises

## 1.4 Drehzahl-Regelkreis

Nun folgt der Drehzahl-Regler. Dieser Regelkreis ermittelt den Sollstrom  $i_{S,y,Soll}$ . In der Abbildung 1.7 ist das Blockschaltbild mit den berücksichtigten Elementen dargestellt. Die Bezeichnungen der Übertragungsfunktionen stimmen mit dem Matlab-File überein. Zur Bestimmung der Regelparameter muss die zu regelnde Strecke identifiziert werden.

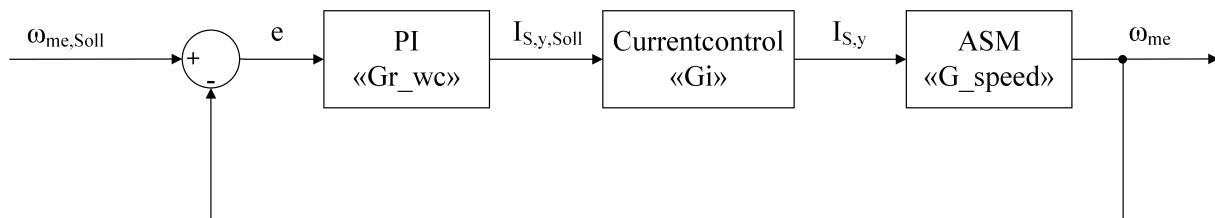


Abbildung 1.7: Blockdiagramm der Drehzahl-Regelung

### 1.4.1 ASM - Drehzahl in Funktion von Statorstrom: G\_speed

Die mathematische Beschreibung der ASM im Frequenzbereich ist in den Gleichung 1.21 ersichtlich. Im Gegensatz zu den vorherigen Strecken mit stationärem Endwert hat diese zu regelnde Strecke eine Integral-Charakteristik. Das führt zu einem unterschiedlichem Vorgehen bei der linearen Reglerauslegung. Die Beziehung zwischen Drehzahl und Statorstrom (y-Komponente)

wird mit einem Zwischenschritt über das elektrische Moment gemacht (Gleichung 1.18). Die Polpaarzahl  $p$  beträgt zwei und das Trägheitsmoment der Maschine (gekoppelt mit einer DCM) wird mit  $0.088 \text{ kgm}^2$  angenommen.

$$M_{el} = \frac{|\Psi_{R,x}|}{k} \cdot i_{S,y} \quad (1.18)$$

$$k = \frac{2 \cdot L_R}{3 \cdot p \cdot L_h} \quad (1.19)$$

Durch Integration des Moments kann auf die Drehzahl  $\omega_{me}$  zurückgeschlossen werden (Gleichung ??). Für die lineare Reglerauslegung beträgt das Lastmoment  $M_{Load} = 0$ .

$$\omega_{me} = \frac{1}{J_{tot}} \cdot \int (M_{el} - M_{Load}) dt \quad (1.20)$$

Diese physikalischen Beziehungen zusammengefasst und in den Frequenzbereich transformiert ergibt die Übertragungsfunktion  $G\_speed$ .

$$G\_speed = \frac{\omega_{me}}{i_{S,y}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{|\Psi_R|}{J \cdot k} \quad (1.21)$$

#### 1.4.2 Identifizierte Strecke: $G\_speedcurrent$

Wie in Abbildung 1.7 zu sehen, können die beiden Übertragungsfunktionen  $G_i$  und  $G\_speed$  zusammengefasst werden.

$$G\_speedcurrent = G_i \cdot G\_speed \quad (1.22)$$

Anhand dieser Übertragungsfunktion wird nun der PI-Regler ausgelegt.

#### 1.4.3 Drehzahlregler $Gr\_wc$

Der offene Regelkreis (ohne Regler) ist  $F_0(j\omega) = G_i \cdot G\_speed = G\_speedcurrent$  und ist somit die zu regelnde Strecke. Die Strecke hat keinen stationären Endwert, sondern eine Integral-Charakteristik. So muss der Bode Satz 4 erfüllt sein. (Anleitung gemäss [2, S. 45]). Die Übertragungsfunktionen sind im Bodeplot 1.8 abgebildet.

1. Die Frequenz  $\omega_1$  (Übergang von -1 D/D auf -2 D/D) liegt bei  $330 \frac{rad}{s}$ .
2. Die Eckfrequenz des PI-Reglers wird auf  $\omega_1/10$  gelegt =  $33 \frac{rad}{s}$ . Somit beträgt die Integralverstärkung  $ki\_wc = 33$ .
3. Die Proportionalverstärkung  $kp\_fc$  beträgt 3.77. Somit ist die Verstärkung des Amplitudengangs bei in der Mitte des -1 D/D-Stück Eins.

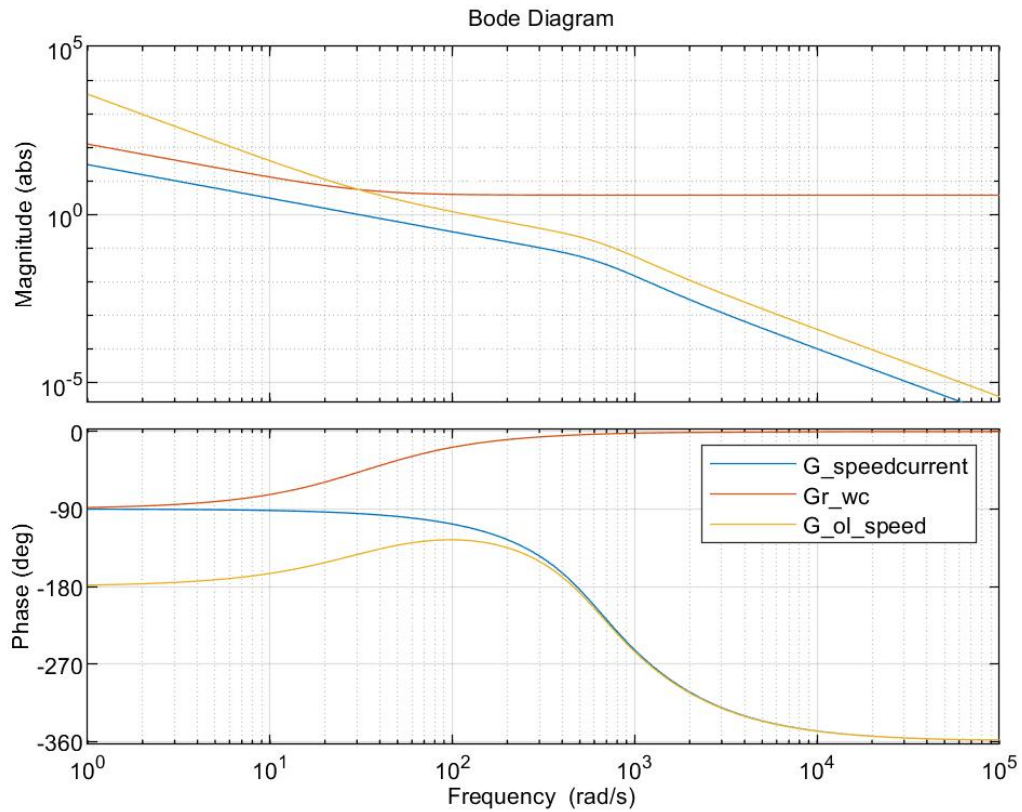
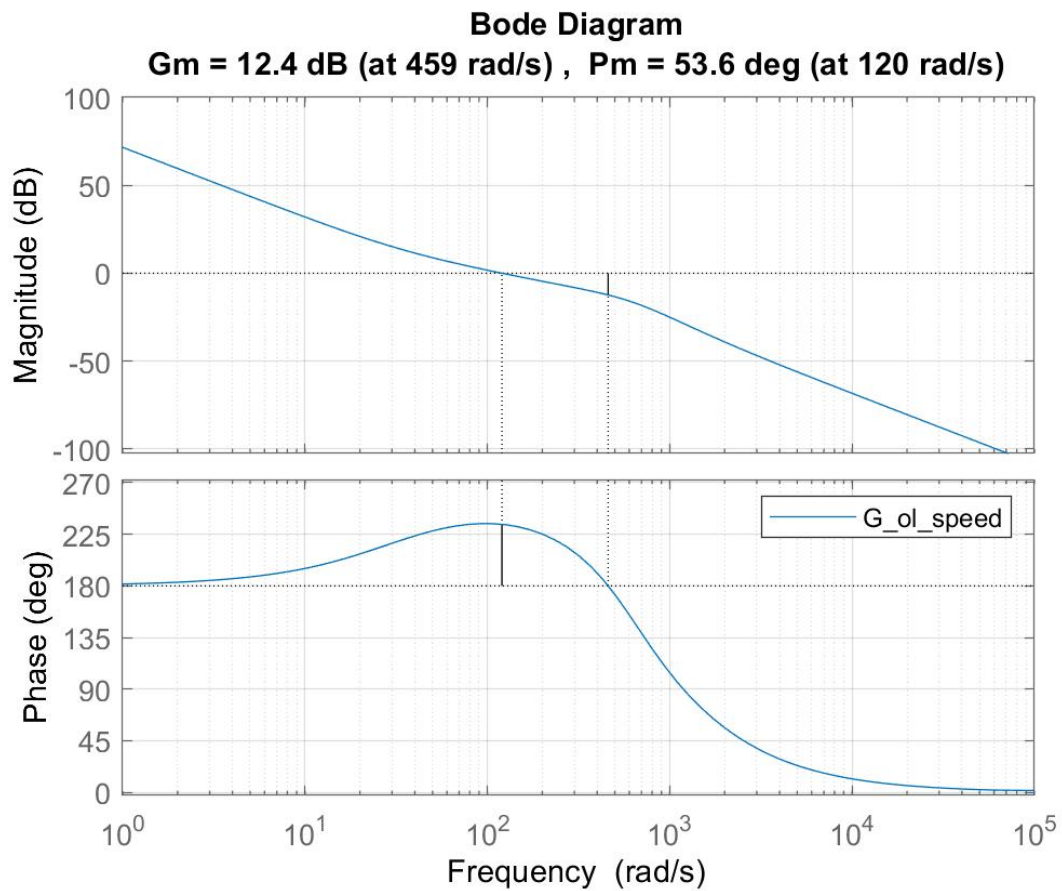


Abbildung 1.8: Bodediagramm der zu regelnde Strecke  $G\_speedcurrent$

In Abbildung 1.9 ist die offene Regelstrecke  $G\_ol\_speed = Gr\_fc \cdot G\_speedcurrent$  im Bodeplot abgebildet. Bei  $kp\_wc = 3.77$  und  $ki\_wc = 33$  beträgt die Phasenreserve 53.6 deg und die Amplitudenreserve 12.4 dB.



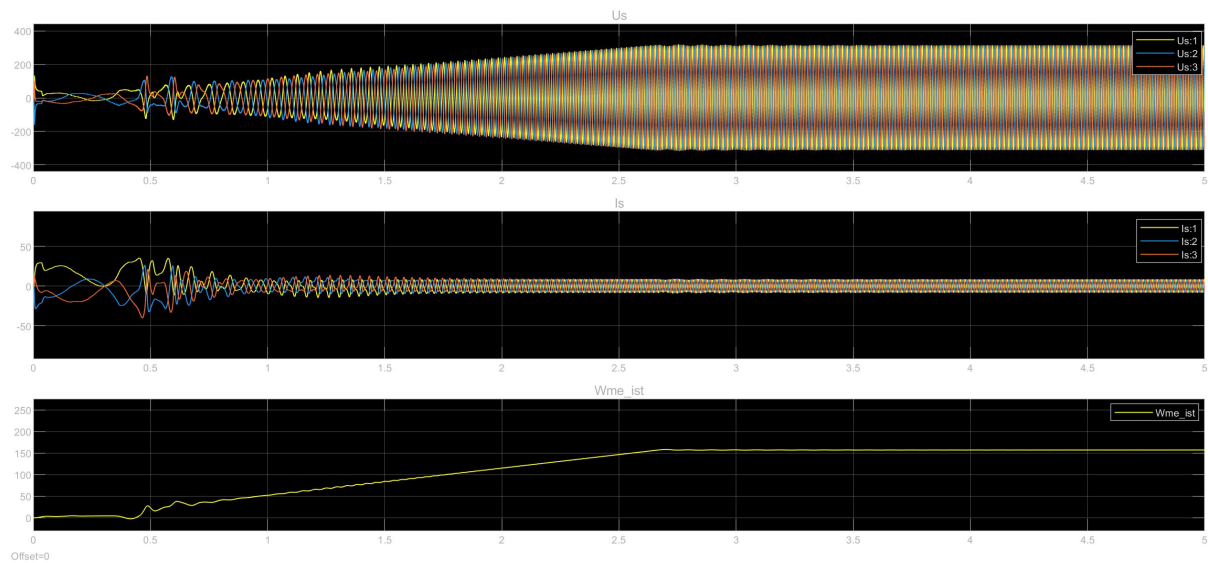
**Abbildung 1.9:** Bodediagramm des offenen Drehzahl-Regelkreises

## 2 Simulationsresultat

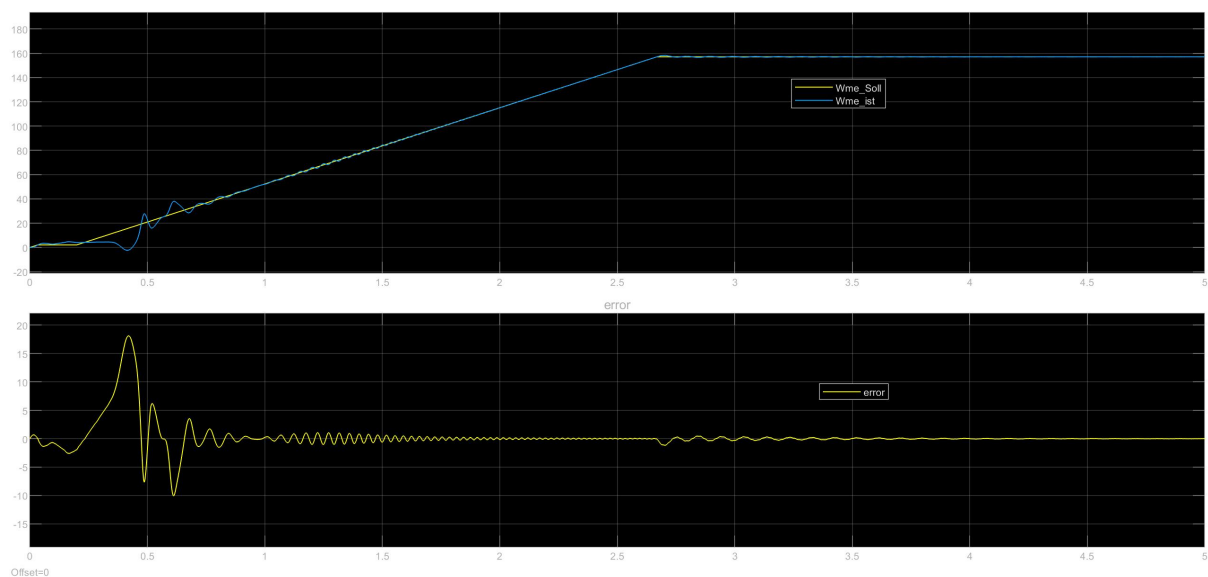
Die ermittelten Regler-Parameter wurden in Simulink simuliert. Die Resultate sind in den Abbildungen 2.1 und 2.2 zu sehen. Abschliessend kann ausgesagt werden, dass das zu regelnde System beim Anlauf auf Nenndrehzahl stabil ist. Jedoch kann die Performance weiter verbessert werden. Die ausgelegten Regelparameter dienen dazu als Basis.

Parameter:	Wert:
kp_cc	5.75
ki_cc	$\frac{L_R \cdot R_S}{L_\sigma^2} = 49.7$
kp_fc	222.22
ki_fc	$\frac{R_R}{L_R} = 6.72$
kp_wc	3.77
ki_wc	33

**Tabelle 2.1:** Die Auflistung der verwendeten Parameter in der Regelung



**Abbildung 2.1:** Simulationsresultat mit Statorstrom, Statorspannung und Drehzahl der ASM



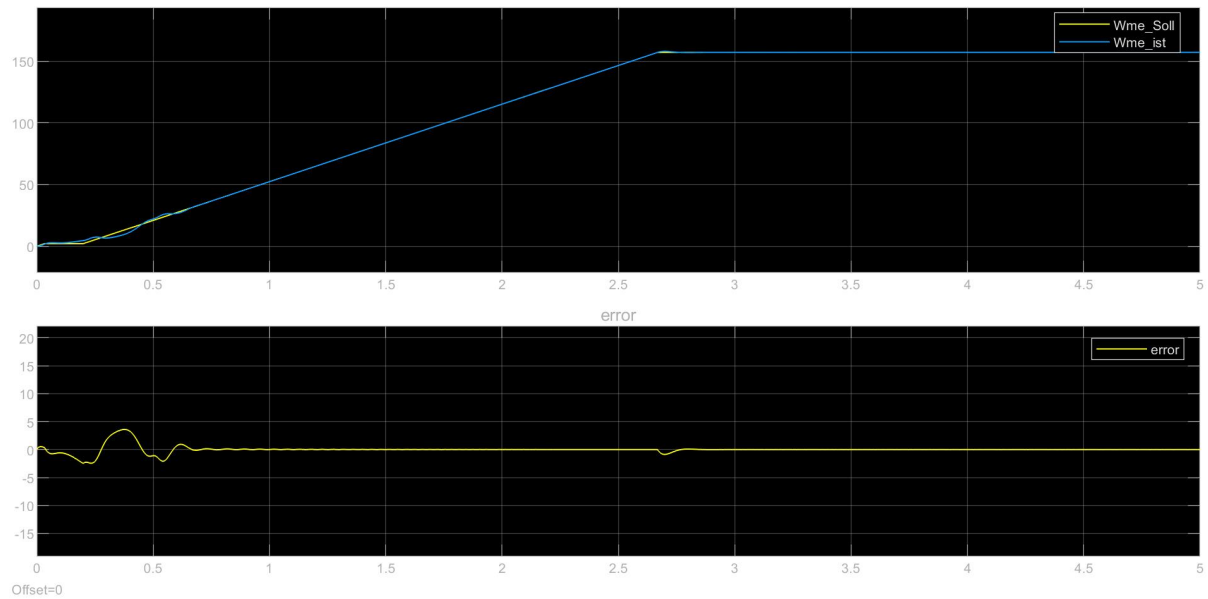
**Abbildung 2.2:** Simulationsresultat des Drehzahlreglers

### 3 Offene Pendenzen

In dieser linearen Reglerauslegung wurden einigen Vereinfachungen angenommen und Elemente nicht berücksichtigt. Folgend werden die offenen Punkte aufgelistet. Bei einer genaueren Analyse können diese berücksichtigt werden.

- Der Flussrechner wurde nicht berücksichtigt. Für ein stabiles System muss der Flussrechner auch stabil sein. In einem weiteren Schritt kann dies analysiert werden.
- Es wurden keine Filter berücksichtigt, die in der Simulation vorhanden sind.
- Die Programmbearbeitung läuft diskret und nicht zeit-kontinuierlich. Dies wurde nur bei der Zeitverzögerung im Stromregelkreis näherungsweise berücksichtigt.

- Der Modulator wurde in der obigen Auslegung in der Zeitverzögerung „mitberücksichtigt“ (siehe Anhang A.1)
- Die Performance der Drehzahlregelung ist nicht optimal, vor allem beim Start der Solldrehzahl-Erhöhung treten grosse Abweichungen auf (siehe Abbildung 2.2).
- Während dem Tunen wurde ein besseres Resultat erzielt. Dabei wurden folgende Parameter verwendet:  $kp_{cc} = 50.75$  und  $kp_{fc} = 22.22$ . Das Resultat ist in Abbildung 3.1 ersichtlich.



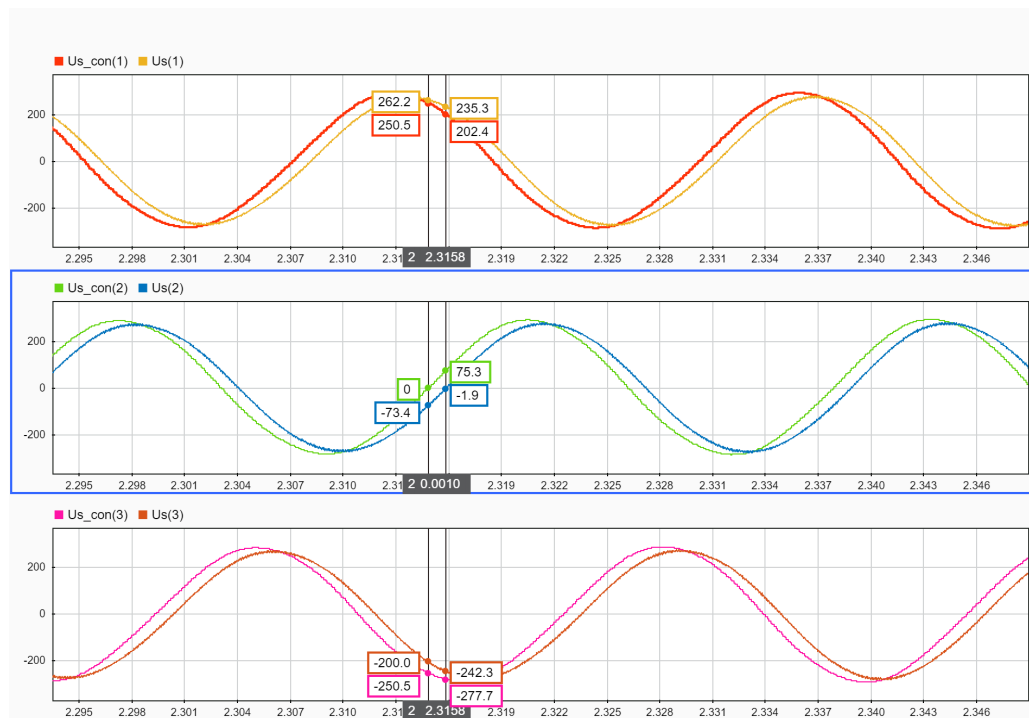
**Abbildung 3.1:** Simulationsresultat des Drehzahlreglers während Tunen

## 4 Literatur

- [1] Felix Jenni und Xinhua Ke, „Geregelte antriebe mit drehfeldmaschinen und selbstgeführten stromrichtern“, Unpubliziertes Dokument, Windisch: Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), 2019. (Abrufdatum 6. Aug. 2019).
- [2] Xinhua Ke, „Lineare regelungen: Systemdarstellungen und auslegung von reglern“, Unpubliziertes Dokument, Windisch: Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), 2019. (Abrufdatum 6. Feb. 2019).



## A Messungen Zeitverzögerung Modulator



**Abbildung A.1:** Messung der Zeitverzögerung zwischen Modulatoreingang und modulierter Spannung an der ASM