

Sensorlose Zustandsregelung zur Verschleißminderung

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Beckert, Technische Universität Bergakademie Freiberg,
Lehrstuhl Elektrische Energie- und Antriebstechnik
Dipl.-Ing. Henri Arnold, Technische Universität Bergakademie Freiberg,
Lehrstuhl Elektrische Energie- und Antriebstechnik

Sensorless State Control for the Purpose of Wear Reduction

The paper presents a novel estimation algorithm for ac-drives in closed-loop control with oscillatory mechanical system. The algorithm estimates air-gap torque and shaft speed of the asynchronous motor, the torque of the drive shaft, and the speed of the driven machine in dynamic operation. Measured values are stator voltage and stator current of the asynchronous motor. The estimation algorithm consists of a torque observer for the asynchronous machine, an observer for the mechanical system, and a closed-loop regulator, minimizing the air-gap torque error for the purpose of speed estimation. The proposed algorithm can be used as basis for state control with the purpose of wear reduction.

Wear Reduction, Observer, State Control, Sensorless Control, Estimation

1. Einleitung

Bei wichtigen geregelten Drehstromantrieben (wie z.B. den Traktions-, Windenergie-, Schredder- oder Walzwerksantrieben) ist das mechanische System schwingungsfähig. Für regelungstechnische Zwecke wird es meistens durch einen Zweimassendreh Swinger ausreichend genau beschrieben. Seine Eigenfrequenz liegt meist unter 20 Hz. Bei den klassischen Antriebsregelungen führen Änderungen des Luftspalt- oder des Lastmomentes zu Torsionsschwingungen, die das Material ermüden und die Lebensdauer der mechanischen Bauteile verkürzen.

Durch Einbeziehung der Mechanik in die Regelung, wie z.B. mit einer Zustandsregelung, lassen sich die auftretenden Torsionsschwingungen aktiv dämpfen und der Verschleiß vermindern [1, 2]. Für eine solche Zustandsregelung werden die Istwerte aller Zustandsgrößen des mechanischen Systems benötigt. Da ihre kontinuierliche Messung sehr aufwändig wäre, werden sie zweckmäßig mit Hilfe eines Beobachters rekonstruiert.

Alle bekannten Beobachter des mechanischen Systems bilden den Beobachtungsfehler aus der gemessenen und der geschätzten Motordrehzahl, erfordern also einen Drehzahlgeber mit hoher Auflösung. Besonders im Traktionsbereich und bei Schredderantrieben müssen die Drehzahlgeber jedoch sehr robust sein. Dies verhindert den Einsatz von optischen Inkrementalgebern mit hoher Auflösung. Man ist deshalb zunehmend bestrebt, den Antrieb sensorlos zu regeln [3, 4].

Im Beitrag wird über eine sensorlose Zustandsregelung zur aktiven Schwingungsdämpfung und Verschleißminderung berichtet. Kernstück dieser Zustandsregelung ist eine Schätzeinrichtung, die das Luftspaltmoment und die Drehzahl der Asynchronmaschine, das Wellenmoment im mechanischen Antriebsstrang sowie die Drehzahl und das Lastmoment der Arbeitsmaschine während des stationären und dynamischen Betriebes in hoher Qualität schätzt und die keinen Drehzahlsensor benötigt. Gemessen werden nur die Komponenten des Ständerstroms- und Ständerstromraumvektors.

Die Schätzeinrichtung besteht aus drei Komponenten (s. Prinzipschaltbild, Bild 1), einem Drehmoment-Beobachter der Asynchronmaschine, einem Beobachter des als Zweimassendrehchwinger vorausgesetzten mechanischen Systems und einer Regelung des Luftspaltmoment-Fehlers zur Schätzung der Motordrehzahl.

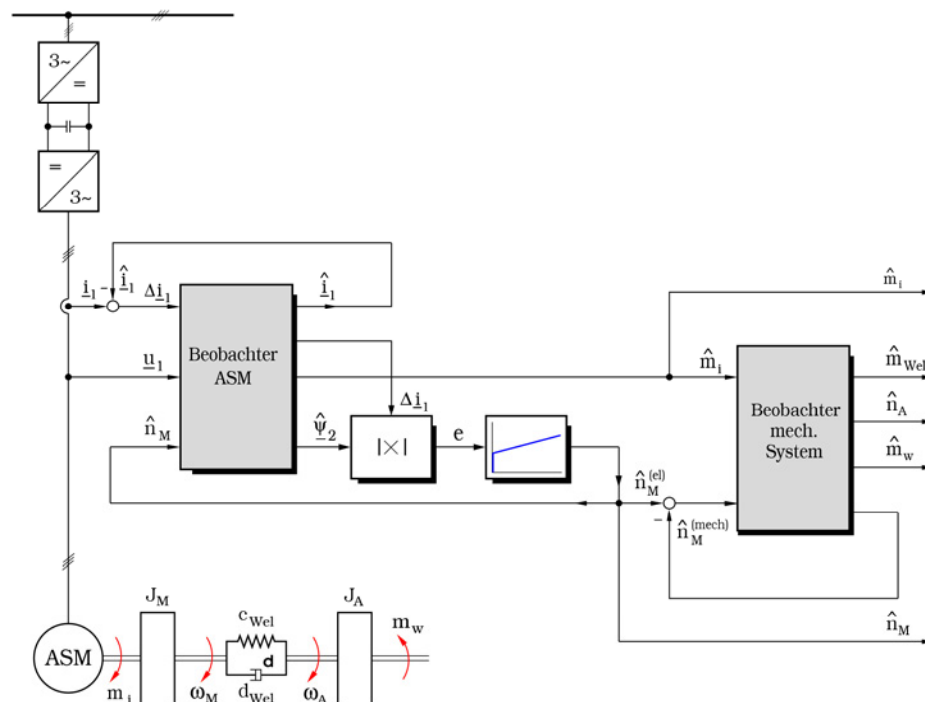


Bild 1: Prinzipschaltbild der Schätzeinrichtung

2. Modell der Asynchronmaschine

Der entwickelten Schätzeinrichtung liegt das bekannte mathematische Modell des stromverdrängungsfreien Asynchronmotors im ständerbezogenen Koordinatensystem α, β zugrunde [5]:

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - R_1 \underline{i}_1 \quad \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = jn \underline{\psi}_2 - R_2 \underline{i}_2 \quad (1, 2)$$

$$\underline{\psi}_1 = X_1 \underline{i}_1 + X_h \underline{i}_2 \quad \underline{\psi}_2 = X_h \underline{i}_1 + X_2 \underline{i}_2 \quad (3, 4)$$

$$m_i = \underline{\psi}_1 \times i_1 = \frac{X_h}{X_2} (\underline{\psi}_2 \times i_1) \quad (5)$$

$$\frac{dn}{dt} = \dot{n} = \frac{1}{T_M} (m_i - m_w) \quad (6)$$

Darin sind \underline{u}_1 der Raumvektor der Ständerspannung, $\underline{\psi}_1, \underline{\psi}_2$ die Raumvektoren des Ständer- und Läuferflusses, i_1, i_2 die Raumvektoren der Ständer- und Läuferströme, R_1, R_2 die Ständer- und Läuferwiderstände,

$$X_1 = X_h + X_{\sigma 1} \quad X_2 = X_h + X_{\sigma 2} \quad (7)$$

die Ständer- und Läuferreaktanzen, X_h die Hauptfeldreaktanz und $X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$ die Ständer- und Läuferstreureaktanzen.

Dieses Gleichungssystem gilt unter den idealisierenden Annahmen

- eines vollkommen symmetrischen Aufbaus der Maschine,
- eines sinusförmigen Luftspaltfeldes,
- eines konstanten Sättigungszustandes sowie
- unter Vernachlässigung der Stromverdrängung und der Eisenverluste.

Für die verwendeten komplexen Raumvektoren gilt die Definition nach KOVACS [5]. Alle vorkommenden Variablen und Parameter sind normierte (per-unit) Größen. Bei der Normierung wurden die üblichen Bezugsgrößen [5] verwendet.

$$T_M = \omega_{1n} \frac{J_M \omega_{1n} / p}{M_n}$$

ist die bezogene Anlaufzeitkonstante, die man bei der Normierung der Bewegungsgleichung erhält, p die Polpaarzahl

$$\omega_{1n} = 2 \pi f_{1n} \quad \text{und} \quad M_n = \frac{3 U_{1n} I_{1n}}{\omega_{1n} / p} \quad (8)$$

der Bezugswert der Drehmomente.

3. Drehmoment-Beobachter der ASM

Die Schätzung des Luftspaltmomentes der Asynchronmaschine erfolgt mit einem Beobachter, dem das \underline{u}_1, n -Modell zugrunde liegt. Es wird durch die Differentialgleichungen

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - \frac{R_1}{\sigma X_1} \left[\underline{\psi}_1 - \frac{X_h}{X_2} \underline{\psi}_2 \right] \quad (9)$$

$$\frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = jn \underline{\psi}_2 - \frac{R_2}{\sigma X_2} \left[\underline{\psi}_2 - \frac{X_h}{X_1} \underline{\psi}_1 \right] \quad (10)$$

beschrieben. Darin ist σ die Gesamtstreuiziffer der Asynchronmaschine.

Zur Verbesserung der Fluss- und Drehmomentschätzung wurde für dieses zeitvariante elektrische Teilsystem ein Beobachter entworfen. Das System heißt zeitvariant, weil die Systemmatrix \underline{A} auch von der Drehzahl abhängt, die sich im dynamischen Betrieb schnell ändern kann. Das Differentialgleichungssystem des Beobachters lautet [6]:

$$\frac{d\hat{\underline{\psi}}_1}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma X_1} \hat{\underline{\psi}}_1 + \frac{R_1}{\sigma X_1} \frac{X_h}{X_2} \hat{\underline{\psi}}_2 + \underline{u}_1 + \underline{K}_1 (i_1 - \hat{i}_1) \quad (11)$$

$$\frac{d\hat{\underline{\psi}}_2}{dt} = \frac{R_2}{\sigma X_2} \frac{X_h}{X_1} \hat{\underline{\psi}}_1 - \left[\frac{R_2}{\sigma X_2} - jn \right] \hat{\underline{\psi}}_2 + \underline{K}_2 (i_1 - \hat{i}_1) \quad (12)$$

$$\hat{\underline{\dot{x}}} = \underline{A}(\underline{n}) \hat{\underline{x}} + \underline{B} \underline{u} + \underline{K} (\underline{y} - \hat{\underline{y}}) \quad (13)$$

$$\hat{i}_1 = \frac{1}{\sigma X_1} \hat{\underline{\psi}}_1 - \frac{1}{\sigma X_1} \frac{X_h}{X_2} \hat{\underline{\psi}}_2 \quad (14)$$

$$\hat{\underline{y}} = \underline{C} \hat{\underline{x}} \quad (15)$$

Zustandsgrößen sind die Komponenten der Ständer- und Läuferflussverkettungen, Eingangsgrößen sind die Ständerspannungskomponenten. Die Ständerstromkomponenten bilden die messbaren Ausgangsgrößen, aus denen der Beobachtungsfehler gebildet wird. Zur Verbesserung der Drehmomentschätzung ist das Motormodell noch um die Hauptfeldsättigung und die Eisenverluste erweitert worden, s. [6].

Für die Rückführkoeffizienten \underline{K} wurde die von Zägelein [7] optimierte Einstellung übernommen. Dadurch erhält man einen Beobachter, der auch bei Parameterverstimmungen von $\pm 20\%$ gegenüber den Mittelwerten das Luftspaltmoment im stationären und im dynamischen Betrieb mit hoher Genauigkeit schätzt.

Anstelle der gemessenen Motordrehzahl n_M wird dem Beobachter der ASM ein von der Fehlerregelung des Luftspaltmomentes gelieferter Schätzwert \hat{n}_M zugeführt: Das Luftspaltmoment lässt sich gemäß Gl. (5) als Kreuzprodukt von Läuferflussraumvektor und Ständerstromraumvektor darstellen. Da der wahre Wert des Läuferflussraumvektors nicht bekannt ist, wird der Fehler des Luftspaltmomentes aus einer ersten und zweiten Näherung gebildet.

$$\Delta m_i = m_i - \hat{m}_i \approx \hat{m}_i - \hat{\hat{m}}_i = \frac{X_h}{X_2} \left| \hat{\underline{\psi}}_2 \times (i_1 - \hat{i}_1) \right| \quad (16)$$

Beide Näherungen verwenden den geschätzten Läuferflussvektor, die erste Näherung benutzt den gemessenen, die zweite Näherung den geschätzten Ständerstromraumvektor. Das Ausgangssignal des PI-Reglers entspricht der Motordrehzahl.

Die erste Näherung

$$\hat{m}_i = \frac{X_h}{X_2} (\hat{\psi}_2 \times i_1) \quad (17)$$

wird als Schätzwert des Luftspaltmomentes verwendet. Bild 2 zeigt das Signalflussbild des Drehmoment-Beobachters der Asynchronmaschine mit Drehzahlschätzung.

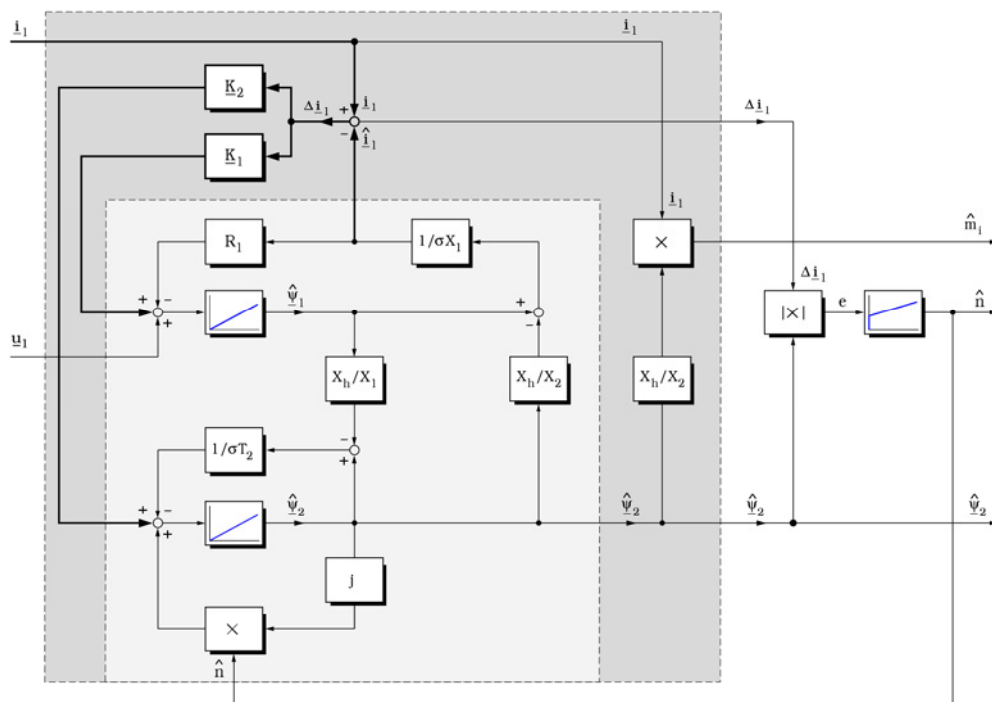


Bild 2: Drehmoment-Beobachter der ASM mit Drehzahlschätzung

4. Beobachter des mechanischen Systems

Das mechanische Teilsystem des Antriebes liegt im Allgemeinen als Mehrmassendrehchwinger vor. Zumindest für regelungstechnische Zwecke lässt sich sein Verhalten meistens durch einen linearen Zweimassendrehchwinger mit den primären und sekundären Schwungmassen J_M und J_A , dazwischen eine elastische Welle mit c_{Wel} und d_{Wel} (Bild 1), ausreichend genau beschreiben.

Zur Schätzung seiner Zustandsgrößen wird für den Zweimassendrehchwinger ein zweiter Beobachter entworfen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einem Beobachter grundsätzlich die gleichen Eingangsgrößen wie dem realen System zugeführt werden müssen:

Die erste Eingangsgröße des Zweimassendrehchwingers, das Luftspaltpmoment m_i , wird vom Drehmoment-Beobachter der ASM geliefert.

Für die zweite Eingangsgröße, das nicht messbare Lastmoment m_w , wird ein Störmodell

$$\frac{dm_w}{dt} = 0 \quad (18)$$

angesetzt. D.h., das Lastmoment wird als neue Zustandsgröße interpretiert und dem Zweimassensystem hinzugefügt.

Der Beobachtungsfehler wird nicht, wie üblich, aus der gemessenen Motordrehzahl n_M und der vom Zweimassenmodell geschätzten Motordrehzahl $\hat{n}_M^{(mech)}$ gebildet, sondern anstelle der gemessenen wird die vom erweiterten Drehmoment-Beobachter der ASM geschätzte Motordrehzahl $\hat{n}_M^{(el)}$ verwendet.

Der auf diese Weise entstehende Beobachter des Zweimassendrehchwingers wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{n}_M \\ \hat{m}_{Wel} \\ \hat{n}_A \\ \hat{m}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{T_M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_c} & 0 & -\frac{1}{T_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{n}_M \\ \hat{m}_{Wel} \\ \hat{n}_A \\ \hat{m}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m_i + \begin{bmatrix} k_M \\ k_{Wel} \\ k_A \\ k_w \end{bmatrix} (\hat{n}_M^{(el)} - \hat{n}_M^{(mech)}) \quad (19)$$

Darin sind

$$T_M = \omega_{1n} \frac{J_M \omega_{1n} / p}{M_n} \quad T_A = \omega_{1n} \frac{J_A \omega_{1n} / p}{M_n} \quad (20, 21)$$

die bezogenen Anlaufzeitkonstanten des Motors und der Last,

$$T_c = \frac{p M_n}{c_{Wel}} \quad (22)$$

die der Federsteifigkeit c_{Wel} entsprechende Zeitkonstante.

Der Beobachterentwurf erfolgt durch Vorgabe der Beobachterpole. Ausgehend von den Eigenwerten des zu beobachtenden Systems, das einen doppelten Eigenwert im Nullpunkt der komplexen Ebene und ein zum Schwingungsglied gehörendes konjugiert komplexes Eigenwertpaar besitzt, hat sich folgende Eigenwertkonfiguration des Beobachters bewährt [2]:

$$s_{B1,2} = \frac{1}{\sqrt{2} T_B} (-v \pm j) \quad s_{B3,4} = \frac{1}{T_0} (-v \pm j) \quad (23)$$

Darin sind

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \sqrt{\frac{1 + T_M / T_A}{T_c T_M}} \quad (24)$$

die bezogene Eigenkreisfrequenz des Zweimassendrehchwingers, T_0 die zugehörige bezogene Zeitkonstante.

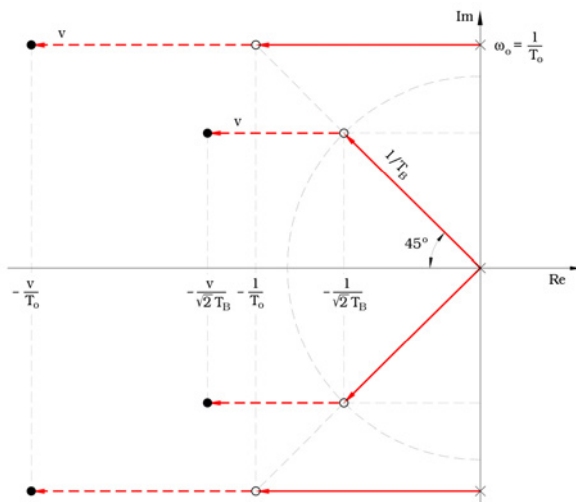


Bild 3:
Eigenwertkonfiguration des Beobachters

- × Eigenwerte des zu beobachtenden Systems
- Eigenwerte des Beobachters

Durch die Einführung der beiden Beobachterparameter T_B und v wird die Polvorgabe physikalisch anschaulich. Die Beobachterzeitkonstante T_B ist ein Maß für die Schnelligkeit des Beobachters, der Parameter v ist hauptsächlich ein Maß für die Dämpfung der mechanischen Eigenschwingungen (Bild 3). Bei $v = 1$ erhält man die natürliche Dämpfung $d = \sqrt{2}/2$.

Über die charakteristische Gleichung des Beobachters erhält man die Rückführkoeffizienten als Funktion der Polvorgabe.

5. Ergebnisse

Die Schätzeinrichtung ist auf einem Signalprozessor TMS320C40 realisiert worden. Bild 4 zeigt für einen Anlauf- und Bremsvorgang die Gegenüberstellung der zeitlichen Verläufe von gemessener und geschätzter Motordrehzahl.

Bild 5 zeigt die zeitlichen Verläufe des geschätzten Luftspaltmomentes, wenn der Drehmoment-Beobachter die gemessene oder die geschätzte Motordrehzahl verwendet.

Erwartungsgemäß liefert die Schätzeinrichtung im Bereich kleiner Drehzahlen ($n < 0.05$) unbefriedigende Ergebnisse. Ursache ist die fehlerhafte Ständerflussberechnung bei kleinen Ständerfrequenzen.

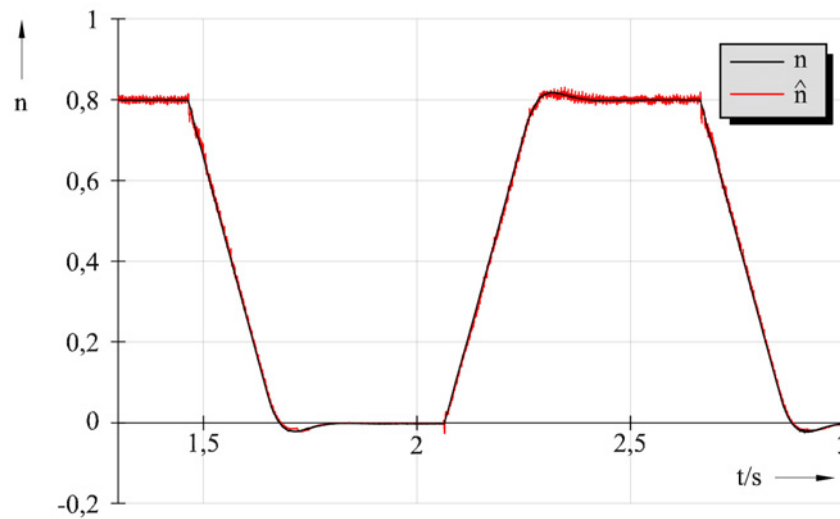


Bild 4: Gegenüberstellung von gemessener und geschätzter Drehzahl beim Anlauf- und Bremsvorgang

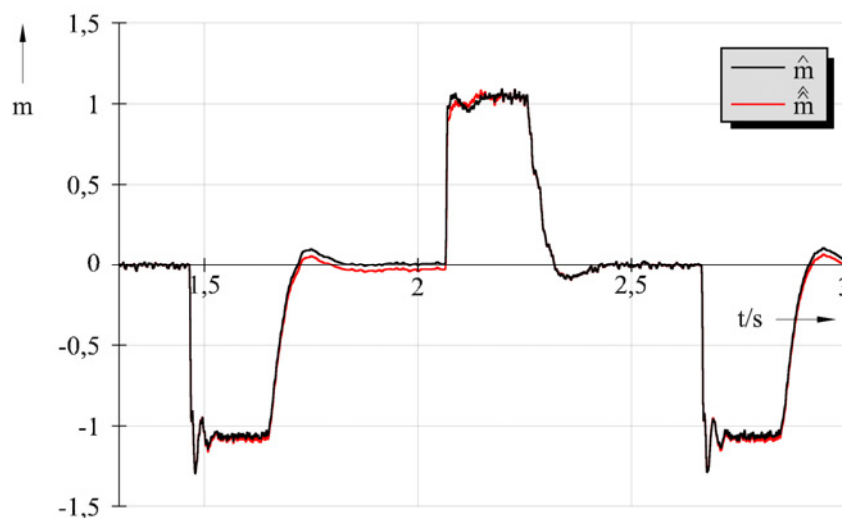


Bild 5: : Gegenüberstellung der Drehmomentschätzung mit gemessener und geschätzter Drehzahl beim Anlauf- und Bremsvorgang

Bild 6 zeigt die aktive Dämpfung der Torsionsschwingungen durch eine Zustandsregelung. Dargestellt sind die zeitlichen Verläufe des Wellenmomentes (leicht geglättet) bei einem Führungssprung von $\Delta n^* = 0.1$ und einem anschließenden Laststoß von $\Delta m_w = 1.0$ bei einer klassischen Antriebsregelung (1) und bei einer Zustandsregelung mit vorgestellter Schätzeinrichtung (2).

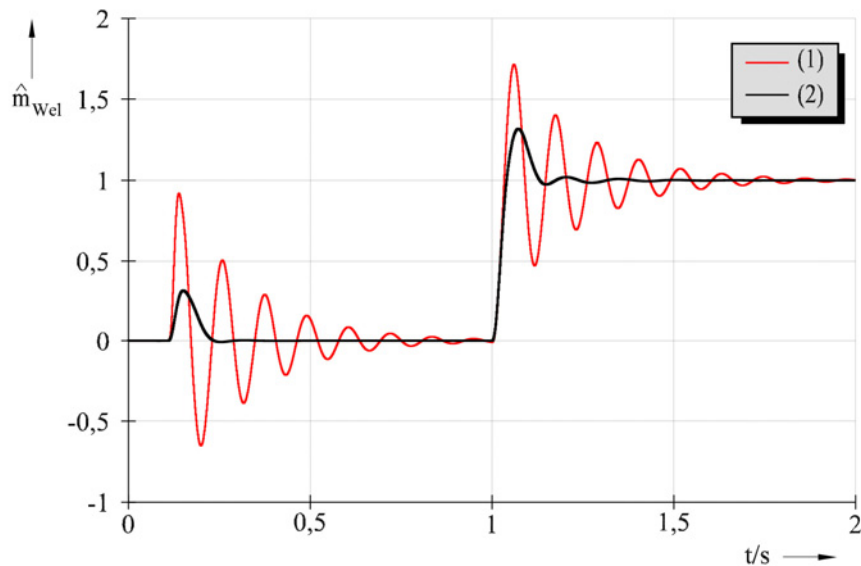


Bild 6: Aktive Schwingungsdämpfung
 Zeitliche Verläufe des Wellenmomentes bei
 klassischer Antriebsregelung (1)
 Zustandsregelung mit Schätzeinrichtung (2)
 $t_1 = 0,1 \text{ s}$: Sollwertsprung $\Delta n^* = 0.1$
 $t_2 = 1 \text{ s}$: Sollwertsprung $\Delta m_w = 1.0$

6. Literatur

- [1] Engel, B.: Verschleißmindernde Kraftschlussregelung mit Zustandsregler für elektrische Traktionsantriebe. Diss. TU Clausthal 1996; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 284; Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- [2] Goslar, M.: Ein Beitrag zur anwendungsorientierten Zustandsregelung elektrischer Hochleistungsantriebe. Diss. TU Clausthal 1998
- [3] Weidauer, B.: Drehgeberlose Regelung umrichter gespeister Induktionsmaschinen in der Traktion. Diss. RU Bochum 1999
- [4] Evers, C.: Beiträge zur drehgeberlosen Regelung wechselrichter gespeister Induktionsmaschinen. Diss. RU Bochum 2004; Aachen: Shaker Verlag 2004
- [5] Pfaff, F.: Regelung elektrischer Antriebe. Bd. 1; R. Oldenbourg Verlag, München-Wien 1994
- [6] Beckert, U.; Scholz, M.: Schätzung des Luftspaltmomentes der Asynchronmaschine mittels Beobachter. Proc. SPS/IPC/DRIVES 99, Nürnberg, 1999, S. 627-636
- [7] Zägelein, W.: Drehzahlregelung des Asynchronmotors unter Verwendung eines Beobachters mit geringer Parameterempfindlichkeit. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg 1984