

# ERHÖHTE LÄUFERERWÄRMUNG VON HOCHDYNAMISCHEN ASYNCHRONMASCHINEN DURCH TRANSIENTE STROMVERDRÄNGUNG

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Beckert

Datum: August 2012

Umfang: 35 Seiten

# Inhaltsverzeichnis

|   |   |       |
|---|---|-------|
| 1 | Einleitung.....   | 3     |
| 2 | Modell der stromverdrängungsfreien Asynchronmaschine.....     | 4     |
| 3 | Grundbeziehungen der FOR.....                                 | 7     |
| 4 | Modell der ASM mit Berücksichtigung der Stromverdrängung..... | 9     |
| 5 | Ergebnisse.....   | 13    |
| 6 | Literatur.....  | 16    |
|   | Formelverzeichnis.....  | 17    |
|   | A6 bis A9.....  | 19-35 |

# 1. Einleitung

Die folgende Untersuchung bezieht sich auf umrichter gespeiste und geregelte hochdynamische Asynchronmaschinen (ASM) mit Käfigläufer größerer Leistung ( $P_n > \approx 500 \text{ kW}$ ), deren Läuferstäbe als Hochstäbe ausgeführt sind.

Anlass der Untersuchung waren thermische Probleme, eine zu starke Läufererwärmung von Prüfstands-Asynchronmaschinen.

Ein Prüfstandsantrieb muss dem Prüfling einen vorgegebenen Drehmoment- und Drehzahlverlauf möglichst genau aufprägen. Dies erfordert schnelle und genaue Regelungen von Drehmoment und Drehzahl [1, 2].

Wegen ihres robusten Läufers, ihres im Vergleich zur Gleichstrommaschine erheblich kleineren Trägheitsmomentes und ihrer größeren Kurzzeitüberlastbarkeit ist die Asynchronmaschine (ASM) für Prüfstandsantriebe besonders geeignet. Um ein möglichst kleines Läuferträgheitsmoment zu erreichen, besitzen Prüfstands-ASM einen schlankeren Läufer, ein kleineres Verhältnis von Läuferdurchmesser zu Blechpaketlänge, als Normmotoren. Dieser relativ kleine Läuferdurchmesser führt bei Prüfstands-ASM größerer Leistung zwangsläufig dazu, dass die Läuferstäbe als Hochstäbe (Bild 4) ausgeführt werden, in denen es bei schnellen Stromänderungen zu transienter Stromveränderung kommt. Darüber hinaus werden Prüfstands-ASM streuungsarm ausgelegt, um über kleinere Kurzschlusszeitkonstanten sehr schnelle Strom- und Drehmomentänderungen zu erhalten.

Als hochwertige Regelverfahren kommen die feldorientierte Regelung (FOR) nach Hasse [3] und Blaschke [4] oder die direkte Selbstregelung (DSR) nach Depenbrock [5] oder Takahashi [6], s.a. [2] zum Einsatz.

Bei der Untersuchung des Regelverhaltens von Asynchronmaschinen wird i. Allg. die Stromverdrängung vernachlässigt und es wird stets das Modell einer stromverdrängungsfreien ASM zugrunde gelegt. Es ist jedoch anzunehmen, dass die schnellen Drehmomentänderungen im Prüfstandsbetrieb zu transienter Stromverdrängung und diese zu zusätzlichen Stromwärmeverlusten im Läufer führen. Im Beitrag wird deshalb das dynamische Verhalten einer feldorientiert geregelten ASM mit Hochstabläufer mit Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung untersucht. Dabei wird die klassische Struktur der FOR gemäß Bild 3 zugrunde gelegt.

## 2. Modell der stromverdrängungsfreien ASM

Während des normalen feldorientiert geregelten Betriebes bleibt die Läuferfrequenz klein, in den Läuferstäben tritt nur geringe Stromverdrängung auf. Allen Arbeiten zur FOR der ASM liegt deshalb das Modell der stromverdrängungsfreien ASM zugrunde. Unter den üblichen idealisierenden Annahmen eines vollkommen symmetrischen Aufbaus der Maschine (Bild 1), eines sinusförmigen Luftspaltfeldes, eines konstanten Sättigungszustandes sowie unter Vernachlässigung der Stromverdrängung und der Eisenverluste wird dieses Modell durch folgendes Gleichungssystem im läuferflussbezogenen Koordinatensystem (x,y) beschrieben [7, 8]:

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{u}_1 - R_1 \underline{i}_1 - j \omega_1 \underline{\psi}_1 \quad (1)$$

$$\frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = -R_2 \underline{i}_2 - j \omega_2 \underline{\psi}_2 \quad (2)$$

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

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

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

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

Darin sind  $\underline{u}_1$  der Raumzeiger der Ständerspannung,  $\underline{\psi}_1, \underline{\psi}_2$  die Raumzeiger der Ständer- und Läuferflussverkettung und  $\underline{i}_1, \underline{i}_2$  die Raumzeiger der Ständer- und Läuferströme,

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

$$X_2 = X_h + X_{\sigma 2}$$

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

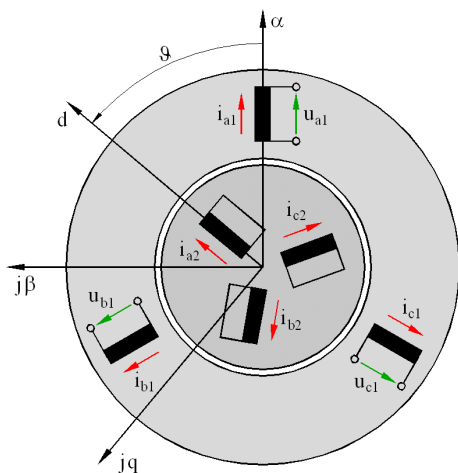


Bild 1:

Ersatzbild des Asynchronmotors

- ständerbezogenes Koordinatensystem  $\alpha, \beta$
- läuferbezogenes Koordinatensystem  $d, q$

Für die verwendeten komplexen Raumzeiger gilt die Definition nach KOVACS [9, 7]. Für den Ständerstromraumzeiger gilt z. B. im ständerbezogenen Koordinatensystem ( $\alpha, \beta$ )

$$\underline{i}_1 = \frac{2}{3} (i_{1a}(t) + \underline{a} i_{1b}(t) + \underline{a}^2 i_{1c}(t)) = i_{1\alpha} + j i_{1\beta} \quad (8)$$

mit  $\underline{a} = e^{j 2\pi/3}$ .

Die Raumzeiger der Käfigwicklung des Läufers sind analog definiert. Für den Läuferstromraumzeiger gilt z.B.:

$$\underline{i}_2 = \frac{2}{N_2} \sum_{\mu=1}^{N_2} i_{2R\mu} e^{j\alpha(\mu-1)}$$

wobei

$$\alpha = p \frac{2\pi}{N_2}$$

der elektrische Nutzwinkel des Läufers und  $i_{2R\mu}$  der Strom im  $\mu$ -ten Ringsegment der Käfigwicklung (Bild 2) sind.

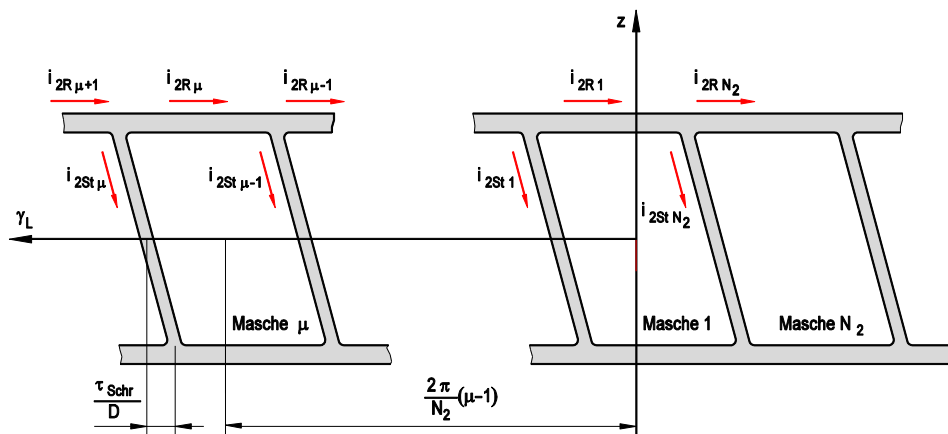


Bild 2: Abwicklung der Käfigwicklung

Im mit  $\omega_1$  rotierenden läuferflussbezogenen Koordinatensystem  $(x,y)$  gilt für den Ständerstromraumzeiger:

$$\underline{i}_1 = i_{1x} + j i_{1y} \quad (9)$$

Für die FOR werden die Transformationsbeziehungen zwischen dem  $\alpha,\beta$ - und dem  $x,y$  - Koordinatensystem

$$\underline{i}_1(\alpha, \beta) = \underline{i}_1(x, y) e^{j\varphi} \quad (10)$$

$$\underline{i}_1(x, y) = \underline{i}_1(\alpha, \beta) e^{-j\varphi}$$

benötigt, die man aus Bild 3 ablesen kann.

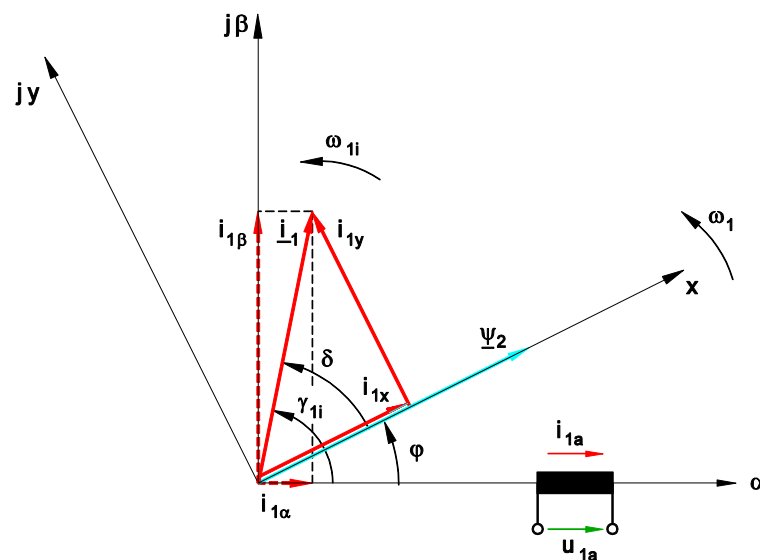


Bild 3: Ständerstromraumzeiger  $\underline{i}_1$   
im ständerfesten Koordinatensystem  $\alpha, \beta$   
im synchron mit dem Läuferflussraumzeiger  $\underline{\psi}_2$   
rotierenden Koordinatensystem  $x, y$

Ohne besondere Kennzeichnung sind alle Läufergrößen auf den Ständer umgerechnet. Außerdem sind alle vorkommenden Variablen und Parameter normiert. Dabei wurden folgende Bezugsgrößen (Index B) verwendet):

$$\begin{aligned}
 f_B &= f_{1n} & U_B &= \sqrt{2} U_{1n} \\
 n_B &= \frac{f_{1n}}{p} & I_B &= \sqrt{2} I_{1n} \\
 \omega_B &= \omega_{1n} = 2\pi f_{1n} & R_B = X_B &= \frac{U_B}{I_B} \\
 t_B &= \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{2\pi f_{1n}} & \psi_B &= \frac{U_B}{\omega_B} = \frac{\sqrt{2} U_{1n}}{2\pi f_{1n}} \\
 M_B &= \frac{P_B}{\omega_B/p} = \frac{3p U_{1n} I_{1n}}{2\pi f_{1n}} ,
 \end{aligned} \tag{11}$$

wobei  $U_{1n}$  die Nennstrangspannung,  $I_{1n}$  der Nennstrangstrom und  $f_{1n}$  die Nennfrequenz sind.

$$T_A = \omega_B \frac{J \omega_B/p}{M_B} \tag{12}$$

ist die bei der Normierung der Bewegungsgleichung entstehende bezogene Anlaufzeitkonstante.

### 3. Grundbeziehungen der FOR

Bei der FOR erfolgt bekanntlich die gesamte Regelung in einem synchron mit dem Läuferflussraumzeiger  $\underline{\psi}_2$  rotierenden Koordinatensystem, hier mit  $x, y$  bezeichnet. Dabei wird, wie im Bild 3 dargestellt, das Koordinatensystem so gelegt, dass seine reelle Achse immer in Richtung des Läuferflussraumzeigers  $\underline{\psi}_2$  zeigt. Nur bei dieser Orientierung ist eine vollständige Entkopplung von drehmoment- und flussbildendem Ständerstrom möglich und nur dann besteht eine vollständige Analogie zur kompensierten fremderregten Gleichstrommaschine.

Bild 4 zeigt das Signalflussbild der klassischen Struktur der FOR. Zerlegt man die komplexen Raumzeiger analog Gl. (9) in ihre Real- und Imaginärteile und berücksichtigt, dass wegen der speziellen Orientierung

$$\underline{\psi}_2 = \psi_{2x} = \psi_2 \quad \psi_{2y} = 0 \quad \frac{d\psi_{2y}}{dt} = 0 \tag{13}$$



sind, so erhält man nach Zwischenrechnung aus den Gln. (1) bis (6) als Grundbeziehungen der FOR:

$$\frac{d \psi_{2x}}{dt} + \frac{R_2}{X_2} \psi_{2x} = \frac{R_2}{X_2} X_h i_{1x}$$

bzw.

$$\frac{\psi_{2x}(s)}{i_{1x}(s)} = \frac{X_h}{1 + s T_2} \quad (14)$$

( $s$  = Laplaceoperator,  $T_2 = X_2/R_2 =$  normierte Läuferzeitkonstante)

und

$$m_i = \frac{X_h}{X_2} \psi_{2x} i_{1y} = - \psi_{2x} i_{2y} \quad (15)$$

Gl. (15) lässt erkennen, dass schnelle Drehmomentänderungen gleichschnelle Änderungen der drehmomentbildenden Ständer- und Läuferstromkomponenten bewirken, die in Hochstäben zu transientser Stromverdrängung mit erhöhten Stromwärmeverlusten führen.

#### 4. Modell der ASM mit Berücksichtigung der Stromverdrängung

Zur Erfassung der Stromverdrängung werden die Hochstäbe des Läufers gemäß Bild 5 fiktiv in je  $n$  übereinanderliegende stromverdrängungsfreie Teilstäbe unterteilt. Auf diese Weise entsteht das Modell einer ASM mit  $n$  Käfigwicklungen im Läufer, die über das Hauptfeld und über das Nutstrefenfeld magnetisch gekoppelt und über gemeinsame Kurzschlussringe galvanisch verbunden sind.

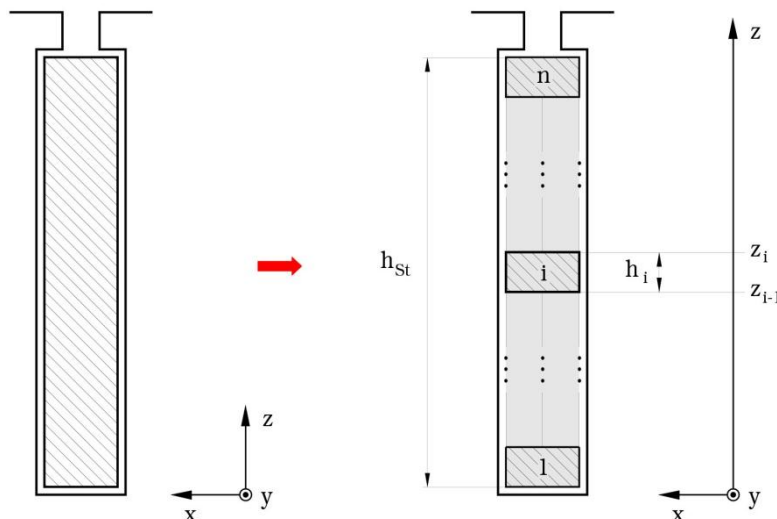


Bild 5: Fiktive Unterteilung der Läuferstäbe in je  $n$  stromverdrängungsfreie Teilstäbe

Im allgemein i-ten Teilstab fließt der zeitlich beliebig verlaufende Teilstabstrom  $i_{2\text{St}i}$ . Unter der Annahme eines reinen Nutquerfeldes und bei Vernachlässigung der magnetischen Spannung im Eisen gilt für den Augenblickswert der Nutstreifungsverkettung des allgemein i-ten Teilstabes

$$\Psi_{\sigma n i} = \mu_0 l_{\text{Fe}} \int_{z_{i-1}}^{z_i} H_x(z) \frac{z - z_{i-1}}{h_i} dz \quad (16)$$

Darin ist

$$H_x(z) = \frac{1}{b_i} \sum_{k=1}^{i-1} i_{2\text{St}k} + \frac{1}{b_i} i_{2\text{St}i} \frac{z - z_{i-1}}{h_i} \quad (17)$$

die magnetische Feldstärke im Bereich des i-ten Teilstabes. Die abschnittsweise Integration von Gl. (16) liefert für die Nutstreifungsverkettung des i-ten Teilstabes

$$\Psi_{\sigma n i} = \sum_{k=1}^n l_{\sigma n k, i} i_{2\text{St}k} \quad (18)$$

Darin sind

$$l_{\sigma n i, i} = \mu_0 l_{\text{Fe}} \left[ \frac{1}{3} \frac{h_i}{b_i} + \sum_{j=i+1}^n \frac{h_j}{b_j} \right] \quad (19)$$

$$l_{\sigma n k, i} = \mu_0 l_{\text{Fe}} \left[ \frac{1}{2} \frac{h_i}{b_i} + \sum_{j=i+1}^n \frac{h_j}{b_j} \right] \quad \text{für } k < i \quad (20)$$

$$l_{\sigma n k, i} = l_{\sigma n k, i} \quad (21)$$

die Selbst- und Gegeninduktivitäten des Nutstreifungsverkettung der allgemein  $\mu$ -ten Masche (Bild 2) des i-ten Teilkäfigs gilt:

$$\Psi_{\sigma n \mu i} = \sum_{k=1}^n l_{\sigma n k, i} (i_{2\text{St}(\mu-1)k} - i_{2\text{St}\mu k}) \quad (22)$$

Ersetzt man mit Hilfe von

$$i_{2\text{St}\mu i} = i_{2R(\mu+1)i} - i_{2R\mu i} \quad (23)$$

die Stabströme  $i_{2\text{St}\mu i}$  durch die Ringsegmentströme  $i_{2R\mu i}$  und fasst die Nutstreifungsverkettungen aller  $N_2$  Läufermaschinen des i-ten Teilkäfigs gemäß

$$\underline{\Psi}_{\sigma n i} = \frac{2}{N_2} \sum_{\mu=1}^{N_2} \Psi_{\sigma n \mu i} e^{j\alpha(\mu-1)} \quad (24)$$

zu einem Raumzeiger zusammen, so erhält man

$$\underline{\Psi}_{\sigma n i} = \sum_{k=1}^n L_{\sigma n k, i} \underline{i}_{2k} \quad (25)$$

Darin sind

$$L_{\sigma n k, i} = [2 \sin \alpha/2]^2 l_{\sigma n k, i} \quad (26)$$

und

$$\underline{i}_{2k} = \frac{2}{N_2} \sum_{\mu=1}^{N_2} i_{2R\mu k} e^{j\alpha(\mu-1)} \quad (27)$$

der Raumzeiger des Läuferstromes des k-ten Teilkäfigs.

Die Spannungsdifferentialgleichung (der Maschensatz) für die  $\mu$ -te Masche (Bild 2) des i-ten Teilkäfigs lautet im läuferbezogenen Koordinatensystem d,q:

$$r_{St i} (i_{2St(\mu-1)i} - i_{2St\mu i}) + \frac{2}{N_2} r_R i_{2R\mu} + \frac{d\psi_{2\mu i}}{dt} = 0 \quad (28)$$

Darin ist

$$r_{St i} = \frac{l_{Fe}}{\kappa_i b_i h_i} \quad (29)$$

der Widerstand eines Stabes des i-ten Teilkäfigs und  $r_R$  der Widerstand eines Kurzschlussringes.

Ersetzt man in den Spannungsdifferentialgleichungen die Stabströme durch die Ringströme und summiert alle  $N_2$  Maschengleichungen des i-ten Teilkäfigs auf, so erhält man die Spannungsdifferentialgleichung des i-ten Teilkäfigs im läuferflussbezogenen Koordinatensystem x,y:

$$\frac{d\underline{\psi}_{2i}}{dt} = -R_{St i} \underline{i}_{2i} - R_R \underline{i}_2 + j \omega_2 \underline{\psi}_{2i} \quad \text{für } i = 1 \dots n \quad (30)$$

Darin ist

$$\underline{\psi}_{2i} = X_h \underline{i}_1 + (X_h + X_{\sigma 2 \text{ red}}) \underline{i}_2 + \sum_{k=1}^n X_{\sigma n k, i} \underline{i}_{2k} \quad \text{für } i = 1 \dots n \quad (31)$$

der Raumzeiger der Gesamtflussverkettung des i-ten Teilkäfigs, die sich aus Haupt- und Streuflussverkettung zusammensetzt. Die Raumzeiger der Teilströme addieren sich zum Läuferstromraumzeiger:

$$\dot{i}_2 = \sum_{i=1}^n \dot{i}_{2i} \quad (32)$$

Außerdem bedeuten

$$R_{Sti} = \frac{3}{N_2} (2 w_1 \xi_{1,1})^2 r_{Sti}/R_B \quad (33)$$

$$R_R = \frac{3}{N_2} \left[ \frac{w_1 \xi_{1,1}}{\sin \alpha/2} \right]^2 \frac{2}{N_2} r_R/R_B \quad (34)$$

$$X_{\sigma n k,i} = \omega_{1n} \frac{3}{N_2} (2 w_1 \xi_{1,1})^2 l_{\sigma n k,i}/X_B \quad (35)$$

die auf den Ständer umgerechneten und normierten Teilstab- und Ringwiderstände sowie die Nutstreureaktanzen des Läufers.

Darin ist

$$\alpha = p \frac{2\pi}{N_2} \quad (36)$$

der elektrische Nutwinkel des Läufers.

Die Gln. (1), (30), (3), (31), (32), (5) und (6) beschreiben in ihrer Gesamtheit das dynamische Verhalten der ASM mit Hochstabläufer mit Berücksichtigung der Stromverdrängung bei zeitlich beliebig verlaufenden Strömen. Durch entsprechend feine Unterteilung der Läuferstäbe kann die transiente Stromverdrängung „beliebig genau“ erfasst werden. Allerdings wächst die Rechenzeit überproportional mit  $n$ , weil eine feinere örtliche Diskretisierung eine kleinere Zeitschrittweite bei der numerischen Integration erfordert.

Für die Stromwärmeverluste im i-ten Teilstab gilt

$$p_{Sti} = r_{Sti} i_{2Sti}^2 = \frac{1}{N_2} r_{Sti} \sum_{\mu=1}^{N_2} i_{2Sti,\mu}^2 = \frac{1}{2} R_{Sti} |\dot{i}_{2i}|^2 \quad (37)$$

bzw. nach Einführung der auf den Ständer umgerechneten und normierten Läufergrößen

$$p_{Sti} = P_B \frac{1}{N_2} R_{Sti} |\dot{i}_{2i}|^2 \quad (38)$$

mit

$$P_B = 3 U_{1n} I_{1n} \quad (39)$$

## 5. Ergebnisse

Bild 6 zeigt die zeitlichen Verläufe der wichtigsten Systemgrößen eines feldorientiert geregelten Asynchronmotors mit Hochstabläufer bei nahezu impulsförmiger Wechselbelastung

$$f_{mw} = 5 \text{ Hz}; \quad \hat{m}_w = 0.8; \quad \bar{m}_w = 0,$$

wie sie für Prüfstandantriebe typisch ist. Dabei wird die ASM mit konstantem Drehzahlsollwert  $n^* = 1.0 = \text{konst.}$  betrieben.

Alle Größen sind normiert dargestellt, wodurch die Ergebnisse relativ allgemeingültig werden.

Für die normierte Zeit gilt:

$$t' = t/T_N, \text{ wobei } T_N = 20 \text{ ms} = \text{Netzperiodendauer.}$$

Bei der Normierung der Drehmomente ist das Nennmoment der ASM als Bezugsmoment gewählt worden  $M_B = M_n$ .

Die Bilder 6a und b zeigen, dass bei einer durch die Regelung konstant gehaltenen Motordrehzahl  $n(t) \approx n^* = 1.0$  das Beschleunigungsmoment verschwindet und die zeitlichen Verläufe des Luftspaltesmomentes und des Widerstandsmomentes praktisch identisch sind  $m(t) \approx m_w(t)$ . Erwartungsgemäß führen schnelle Änderungen des Luftspaltesmomentes bei konstantem Läuferfluss  $\psi_2$  gemäß Gl.(15)

$$m(t) = \frac{X_h}{X_2} \psi_2 i_{1y}(t) = -\psi_2 i_{2y}(t)$$

zu schnellen Änderungen der drehmomentbildenden Ständer- und Läuferstromkomponenten  $i_{1y}(t)$  und  $i_{2y}(t)$ .

Die schnellen zeitlichen Änderungen der Läuferstabströme führen in den Hochstäben zu transientser Stromverdrängung, s. Bild 6d. Dargestellt sind die zeitlichen Verläufe der normierten Stromdichten in den untersten, mittleren und obersten Teilstäben des Läufers. Man sieht auch, dass in Zeitabschnitten konstanten Luftspaltesmomentes praktisch keine Stromverdrängung auftritt. Als Bezugsgröße bei der Normierung der Teilstabstromdichten wurde

$$G_B = \frac{I_B}{A_{\text{Stab}}} = \frac{\sqrt{2} I_{1n}}{A_{\text{Stab}}} \quad (40)$$

verwendet, wobei  $A_{\text{Stab}}$  die Stabquerschnittsfläche ist.

Die transiente Stromverdrängung führt in den Läuferstäben zu erhöhten Stromwärmeverlusten: Bild 6e zeigt die zeitlichen Verläufe der Läuferstromwärmeverluste

mit und ohne Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung. Bild 6f zeigt den zeitlichen Verlauf der zusätzlichen Läuferstromwärmeverluste infolge transienter Stromverdrängung  $\Delta p_v(t) = p_{vm}(t) - p_{vo}(t)$ . Die Fläche unter der Kurve  $\Delta p_v(t)$  entspricht der zusätzlichen Stromwärme infolge transienter Stromverdrängung. Wird sie vernachlässigt, wird die Läufererwärmung im dynamischen Betrieb zu niedrig ermittelt.

Ergänzend zeigen die Bilder 6g und 6h die zeitlichen Verläufe des Ständerstrombetrages, des Betrages des Ständerstromraumzeigers

$$|\underline{i}_1(t)| = \sqrt{i_{1\alpha}^2(t) + i_{1\beta}^2(t)} = \sqrt{i_{1x}^2(t) + i_{1y}^2(t)} \quad (41)$$

sowie der drehmoment- und der flussbildenden Ständerstromkomponenten  $i_{1y}(t)$  und  $i_{1x}(t)$ . Bild 6h lässt auch erkennen, dass im dynamischen Betrieb die Regelungen der fluss- und drehmomentbildenden Stromkomponenten nicht vollständig entkoppelt sind.

Bild 7 zeigt die zeitlichen Verläufe der wichtigsten Systemgrößen beim Betriebsfall „Periodisches Reversieren“. Der ASM wird feldorientiert drehmomentgeregelt (d.h. ohne Drehzahlregelung) betrieben. Beim Erreichen der Umschalt Drehzahlen  $n_u = \pm 0.5$  wird der Drehmomentsollwert  $m^* = \pm 1.05$  umgepolt. Man erkennt, dass beim periodischen Reversieren die transiente Stromverdrängung und die durch sie verursachten zusätzlichen Läuferstromwärmeverluste von besonderer Bedeutung sind.

Den dargestellten Ergebnissen liegt ein vierpoliger 530 kW-Käfigläuferasynchronmotor mit 40 mm hohen Läuferstäben zugrunde. Zur Erfassung der Stromverdrängung sind die Läuferstäbe in je 7 Teilstäbe gleicher Höhe unterteilt worden, d.h., der ASM wurde als 7-fach-Käfigläufermotor behandelt.

Zur Berechnung der zusätzlichen Stromwärme infolge transienter Stromverdrängung lässt sich keine einfache analytische Beziehung angeben. Die zusätzliche Stromwärme wird zweckmäßig mittels Simulation ermittelt. Auf einem modernen PC benötigt die Simulation eines Betriebsfalles des Gesamtsystems (bestehend aus ASM mit Hochstabläufer, mechanischem System, evtl. thermischem System der ASM, Stromrichter, FOR und parallelem Maschinenmodell) nur wenige Sekunden.

Zur Kontrolle wurde das hier verwendete Modell einer Asynchronmaschine mit n-fach Käfigläufer einem Beobachter zugrunde gelegt, der implementiert auf einem Signalprozessor, das dynamische Verhalten der ASM in Echtzeit simuliert: Die Bilder 8 und 9 zeigen das Schätzvermögen des ASM-Beobachters.

In Bild 8 sind für den dynamisch härtesten Betriebsfall „Periodisches Reversieren“ das gemessene und geschätzte Luftspaltmoment einander gegenübergestellt. Der Käfigläufer-

Asynchronmotor wird dabei feldorientiert drehmomentgeregelt betrieben. Beim Erreichen der Umschalt Drehzahlen  $n_u = \pm 0.5$  wird der Drehmomentsollwert  $m^*$  umgepolt. Als gemessenes Luftspaltmoment dient dabei das durch Differentiation der Drehzahl gewonnene Beschleunigungsmoment

$$m(t) = \overline{m}_b(t) = T_A \frac{dn(t)}{dt} \quad (42)$$

D.h., es wird dabei ein reiner Beschleunigungsantrieb vorausgesetzt. Zur Kontrolle der Drehmomentschätzung ist im unteren Diagramm die durch Integration des geschätzten Luftspaltmomentes  $\hat{m}_i$  berechnete Drehzahl

$$\hat{n}(t) = \frac{1}{T_A} \int \hat{m}_i(t) dt \quad (43)$$

der gemessenen Drehzahl  $n$  gegenübergestellt.

Bild 9 zeigt die entsprechenden zeitlichen Verläufe beim Leeranlauf des feldorientiert drehzahlregulierten ASM. Der Drehzahlsollwert wird dabei sprunghaft von  $n^* = 0$  auf  $n^* = 1.0$  geändert.

Die gute Übereinstimmung von geschätzten und gemessenen Verläufen bestätigt die Leistungsfähigkeit des im Beitrag verwendeten Modells eines Asynchronmotors mit n-fach Käfigläufer.

Im Bericht wurden die Ergebnisse für die Betriebsfälle periodische Belastungsänderung bei konstanter Motordrehzahl und periodisches Reversieren vorgestellt. Es sei noch angemerkt, dass das Problem der transienten Stromverdrängung auch bei der Drehschwingungssimulation auftritt.

## 6. Literatur

- [1] Sinn, W.: Drehschwingungssimulation – Ein Prüfstand mit elektrischer Antriebsmaschine zur Nachbildung ungleichförmiger Leistungsabgabe von Verbrennungsmotoren.  
Diss. RWTH Aachen 1993; VDI-Fortschr.-Ber. Reihe 11 Nr. 179; Düsseldorf: VDI-Verlag
- [2] Hörning, G.: Anwendung eines Verfahrens zur direkten Drehmomentregelung von Asynchronmaschinen für Prüfstandantriebe. Diss. TU Darmstadt 1996; VDI-Fortschr.-Ber. Reihe 8 Nr. 537; Düsseldorf: VDI-Verlag
- [3] Hasse, K.: Zur Dynamik drehzahl geregelter Antriebe mit stromrichtergespeisten Asynchron-Kurzschlussläufermaschinen.  
Diss. TU Darmstadt 1969
- [4] Blaschke, F.: Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine.  
Diss. TU Braunschweig 1974
- [5] Depenbrock, M.: Direkte Selbstregelung (DSR) für hochdynamische Drehfeldantriebe mit Stromrichterspeisung.  
Etz-Archiv 7 (1985) Heft 7, S. 221-228
- [6] Takahashi, I.; Noguchi, T.: A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Transaktionen on Industry Applications. Vol. IA-22 (1986) No. 5, S. 820-827
- [7] Pfaff, F.: Regelung elektrischer Antriebe. Bd. 1.; R. Oldenbourg Verlag, München-Wien 1994
- [8] Zägelein, W.: Drehzahlregelung des Asynchronmotors unter Verwendung eines Beobachters mit geringer Parameterempfindlichkeit.  
Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg 1984
- [9] Kovacs, K.P.; Racz, I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Bd. 1 und Bd. 2 Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 1959
- [10] Fürsich, H.: Über das Verhalten von Drehstrom-Käfigankermotoren unter Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer.  
Diss. TU München 1974

## Formelverzeichnis

| Formelzeichen                     | Einheit           |   |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| b                                 | mm                | Breite  |
| f                                 | Hz                | Frequenz  |
| g, G                              | A/mm <sup>2</sup> | Stromdichte   |
| h                                 | mm                | Höhe  |
| H                                 | A/m               | Magnetische Feldstärke                              |
| i, I                              | A                 | Strom   |
| j                                 |                   | Imaginäre Einheit                                   |
| J                                 | kg m <sup>2</sup> | Trägheitsmoment                                     |
| l <sub>Fe</sub>                   | m                 | Blechkpaketlänge                                    |
| m <sub>i</sub>                    | Nm                | Luftspaltmoment                                     |
| m <sub>w</sub>                    | Nm                | Widerstandsmoment                                   |
| n                                 | min <sup>-1</sup> | Drehzahl  |
| N <sub>2</sub>                    |                   | Läufer-Nutzahl                                      |
| r <sub>R</sub> , R <sub>R</sub>   | Ω                 | Ringwiderstand                                      |
| r <sub>St</sub> , R <sub>St</sub> | Ω                 | Stabwiderstand                                      |
| R                                 | Ω                 | Widerstand  |
| s                                 |                   | Laplace-Operator                                    |
| t, t'                             | s                 | Zeit, normierte Zeit                                |
| T <sub>A</sub>                    |                   | Anlaufzeitkonstante                                 |
| T <sub>2</sub>                    | s                 | Läuferzeitkonstante                                 |
| u, U                              | V                 | Spannung  |
| w                                 |                   | Strangwindungszahl                                  |
| X                                 | Ω                 | Reaktanz  |
| α                                 |                   | elektr. Nutwinkel des Läufers                       |
| φ                                 |                   | Verdrehungswinkel x,y gegenüber α,β                 |
| ω                                 | s <sup>-1</sup>   | Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit                |
| ψ                                 | Vs                | Flussverkettung                                     |
| ϑ                                 |                   | Verdrehungswinkel des Läufers gegenüber dem Ständer |

|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Indizes         |                     |
| a, b, c         | Strang a, b, c      |
| B               | Bezugsgröße         |
| h               | Hauptfluss-         |
| i, j, k, n      | Teilstab i, j, k, n |
| n               | Nenn-               |
| N               | Netz-               |
| R               | Ring-               |
| St              | Stab-               |
| x, y            | Real-, Imaginärteil |
| $\alpha, \beta$ | Real-, Imaginärteil |
| $\sigma$        | Streufluss-         |
| $\sigma_n$      | Nutstreufluss-      |
| 1, 2            | Ständer, Läufer     |
|                 |                     |

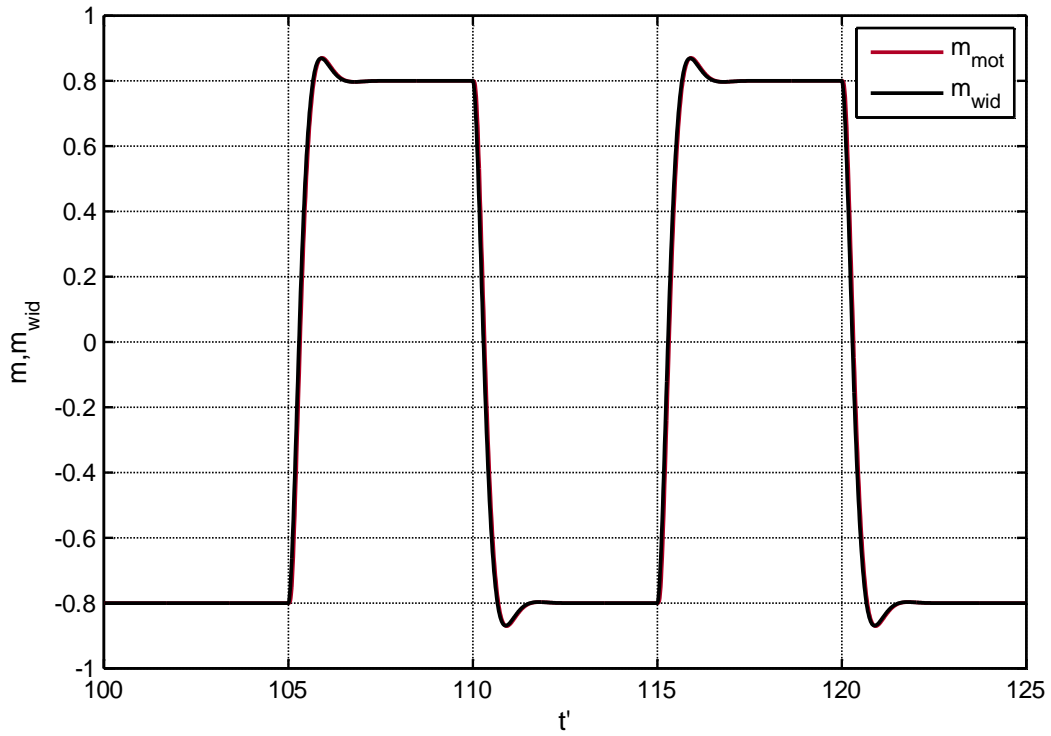
Tabelle: Erläuterung der verwendeten Formelzeichen und Indizes

# **Anhang**

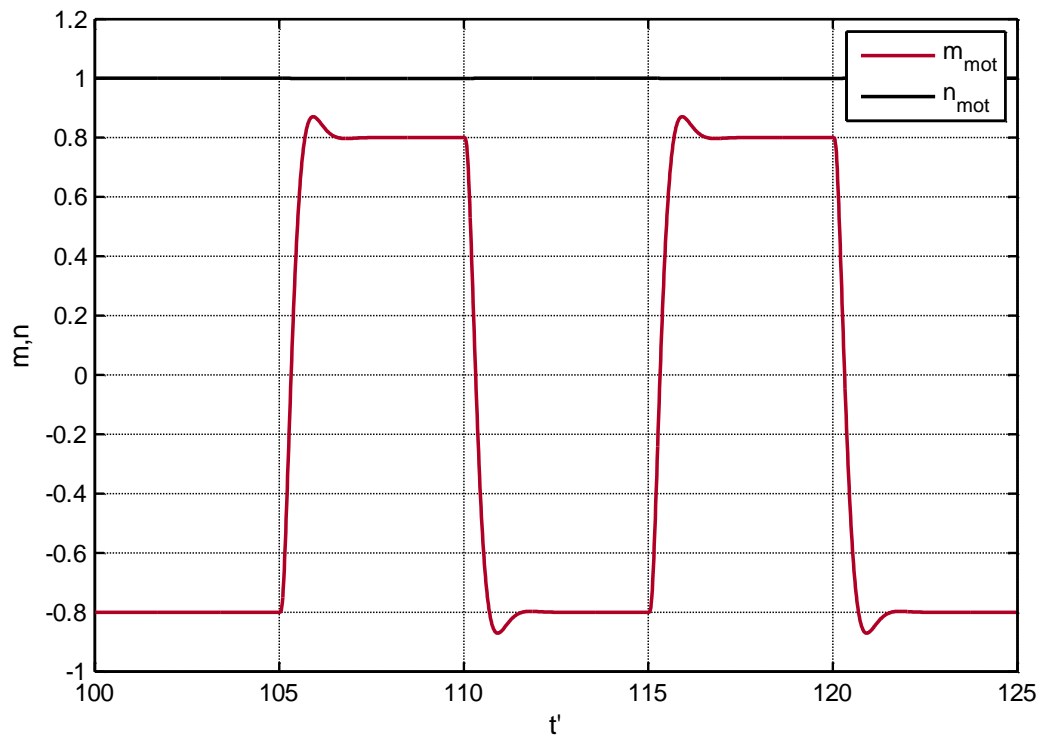
## **Bilder 6 bis 9**

Bilder 6a - 6h:

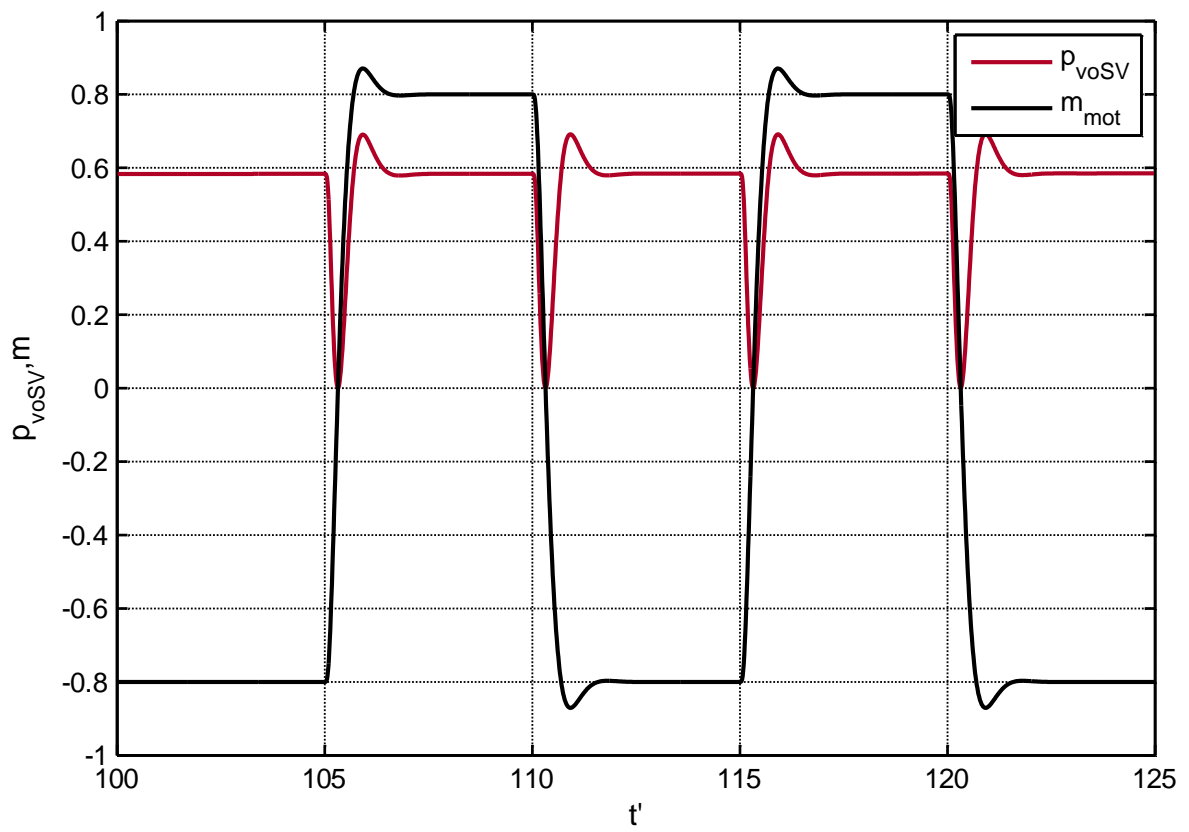
Verhalten der feldorientiert geregelten ASM mit Hochstabläufer  
bei periodisch schwankendem Lastmoment  $f_{mw} = 5 \text{ Hz}$ ;  $\hat{m}_w = 0.8$ ;  $\bar{m}_w = 0$   
und konstantem Drehzahl-Sollwert  $n^* = 1.0$



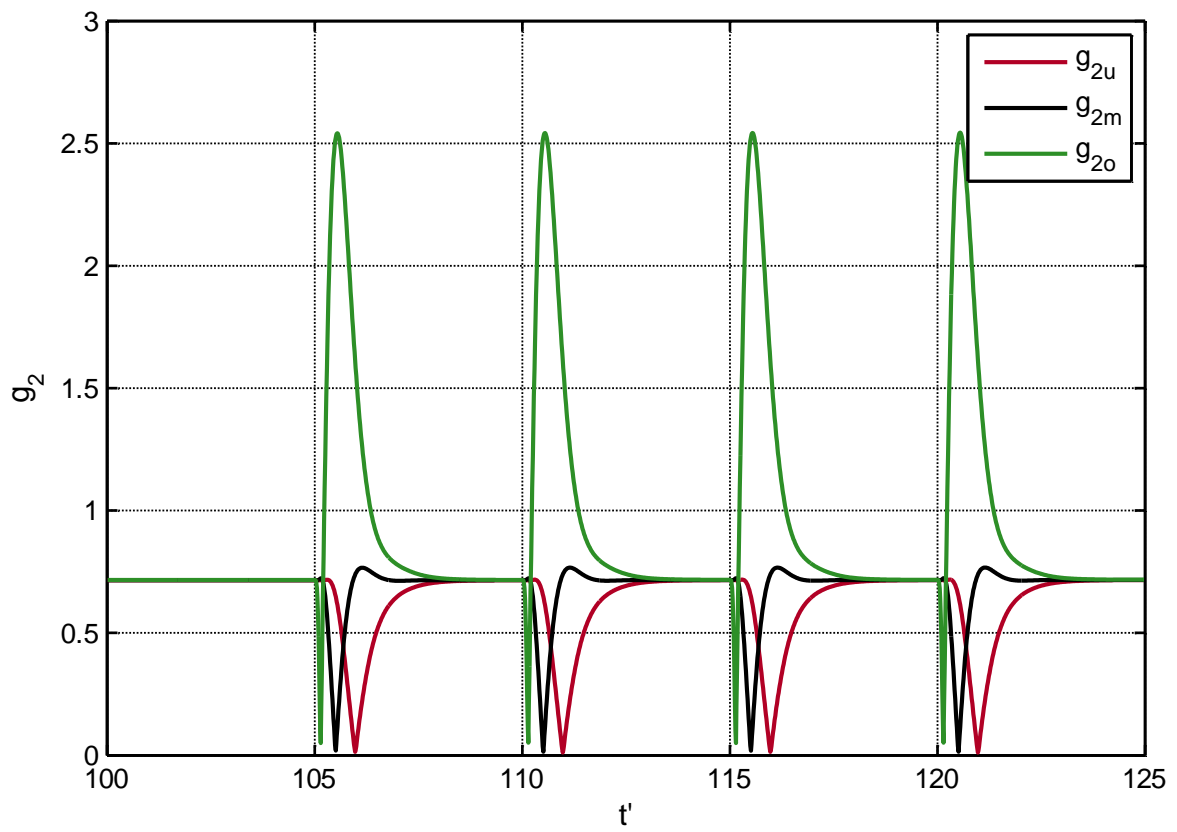
a) Zeitliche Verläufe von Widerstandsmoment  $m_w(t)$  und Luftspaltmoment  $m(t)$



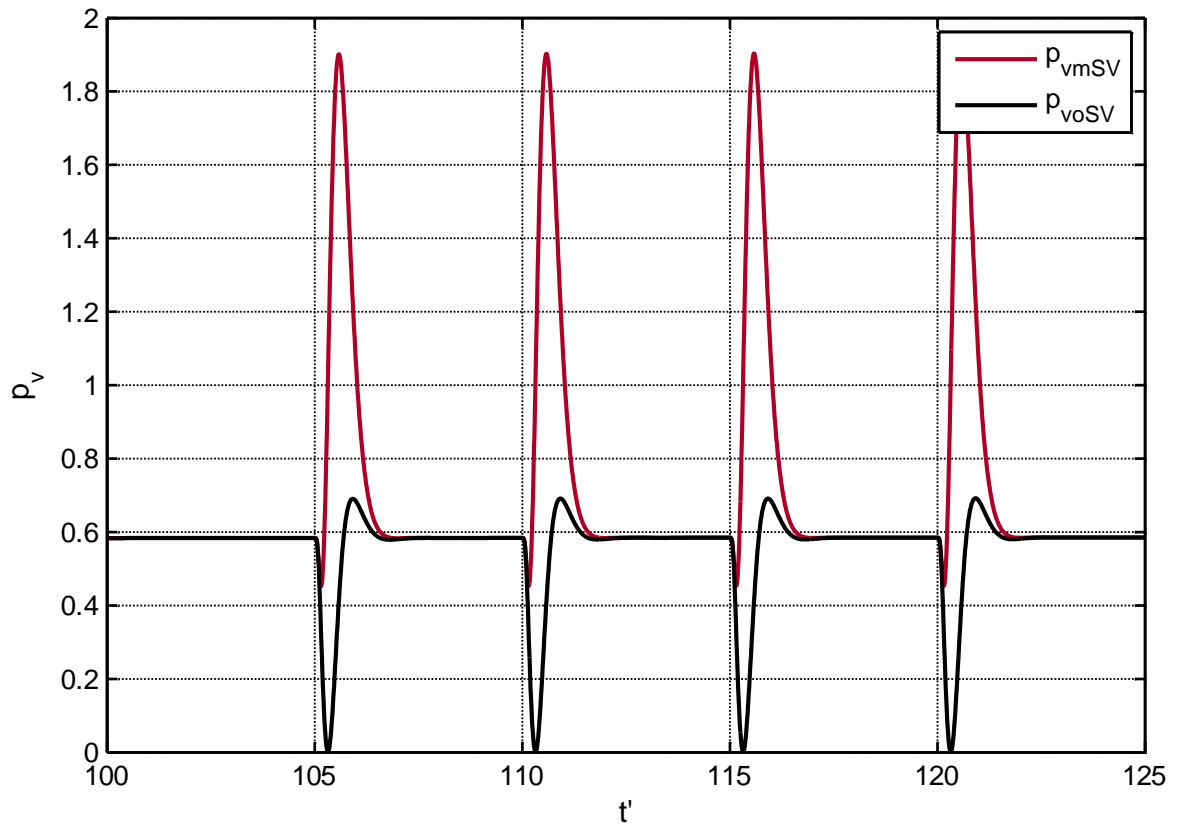
b) Zeitliche Verläufe von Luftspaltpmoment  $m(t)$  und Drehzahl  $n(t)$



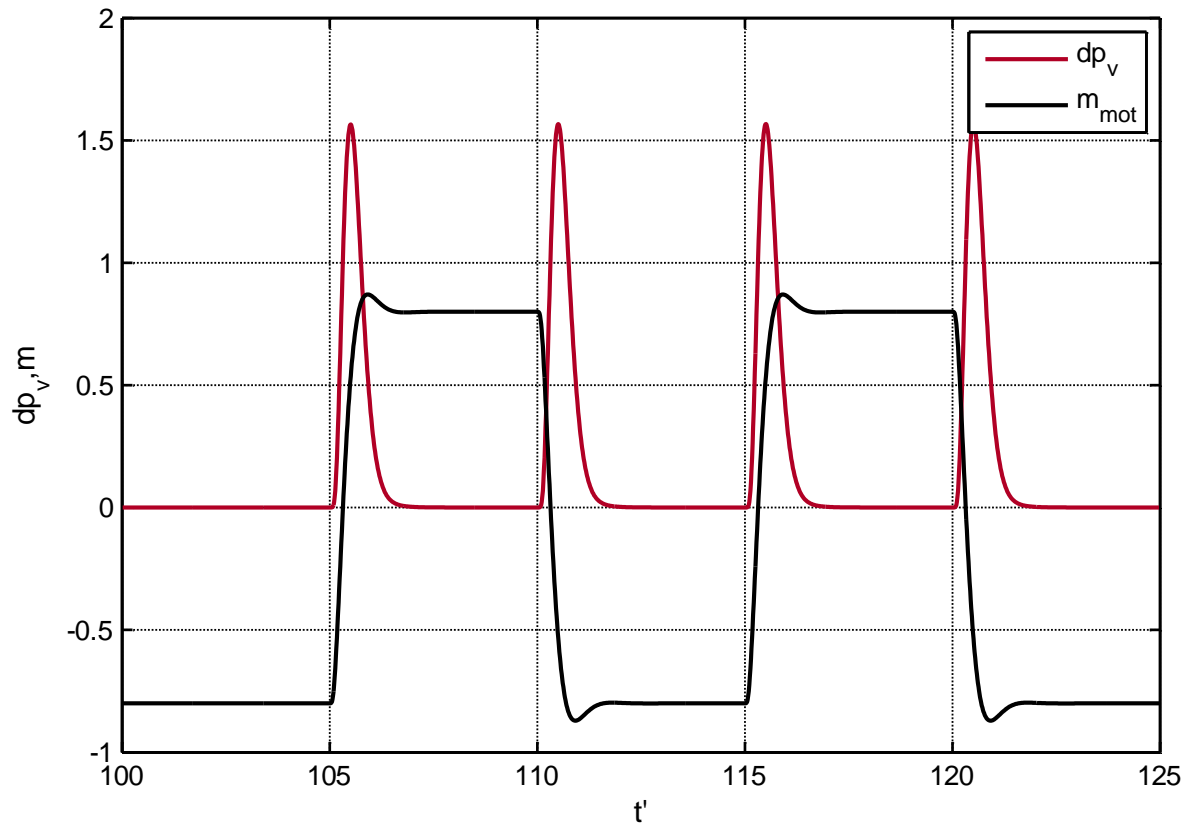
c) Zeitliche Verläufe der Läufer-Stromwärmeverluste ohne Berücksichtigung der Stromverdrängung  $p_{v0}(t)$  und des Luftspaltmomentes  $m(t)$



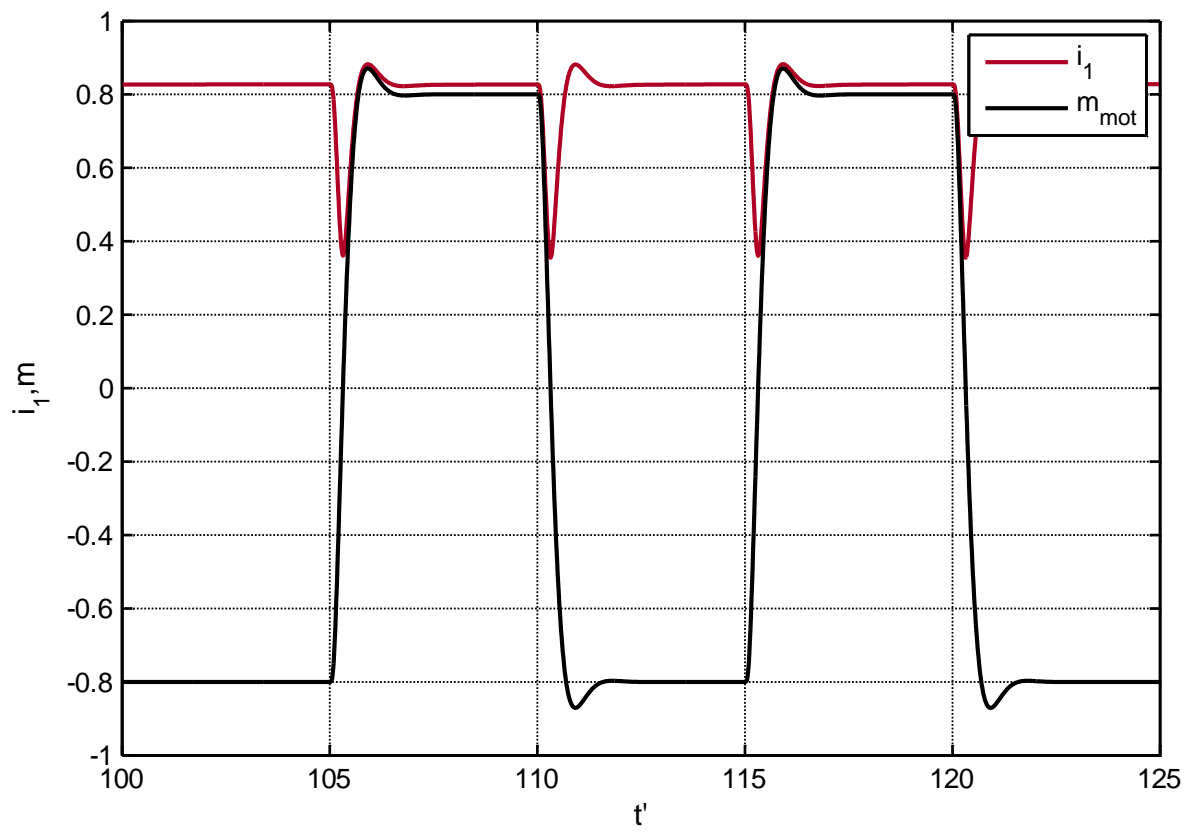
d) Zeitliche Verläufe der Stromdichten  
im untersten, mittleren und obersten Teilstab  $g_{2u,m,o}(t)$



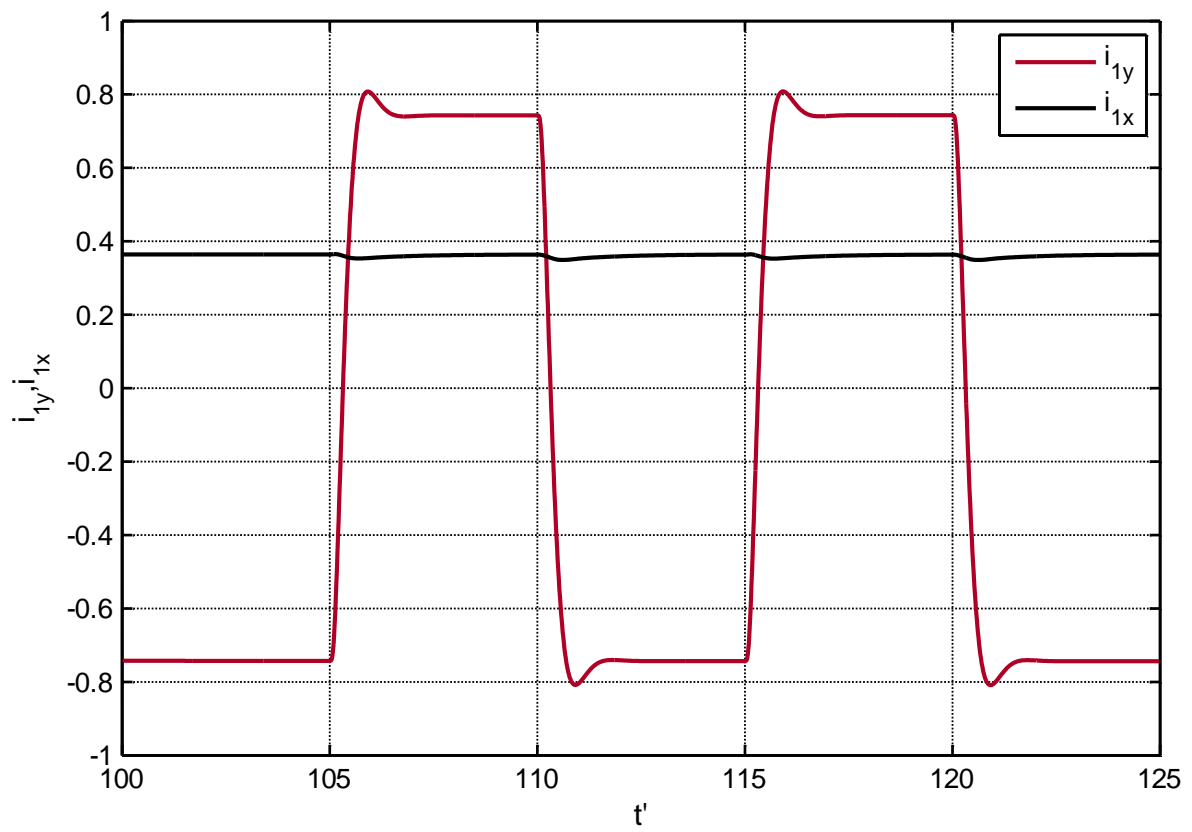
e) Zeitliche Verläufe der Läufer-Stromwärmeverluste mit und ohne Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung  $p_{vm}(t)$  und  $p_{v0}(t)$



- f) Zeitliche Verläufe der zusätzlichen Läuferstromwärmeverluste  
infolge transientser Stromverdrängung  $\Delta p_v(t) = p_{vm}(t) - p_{v0}(t)$   
und des Luftspaltmomentes  $m(t)$



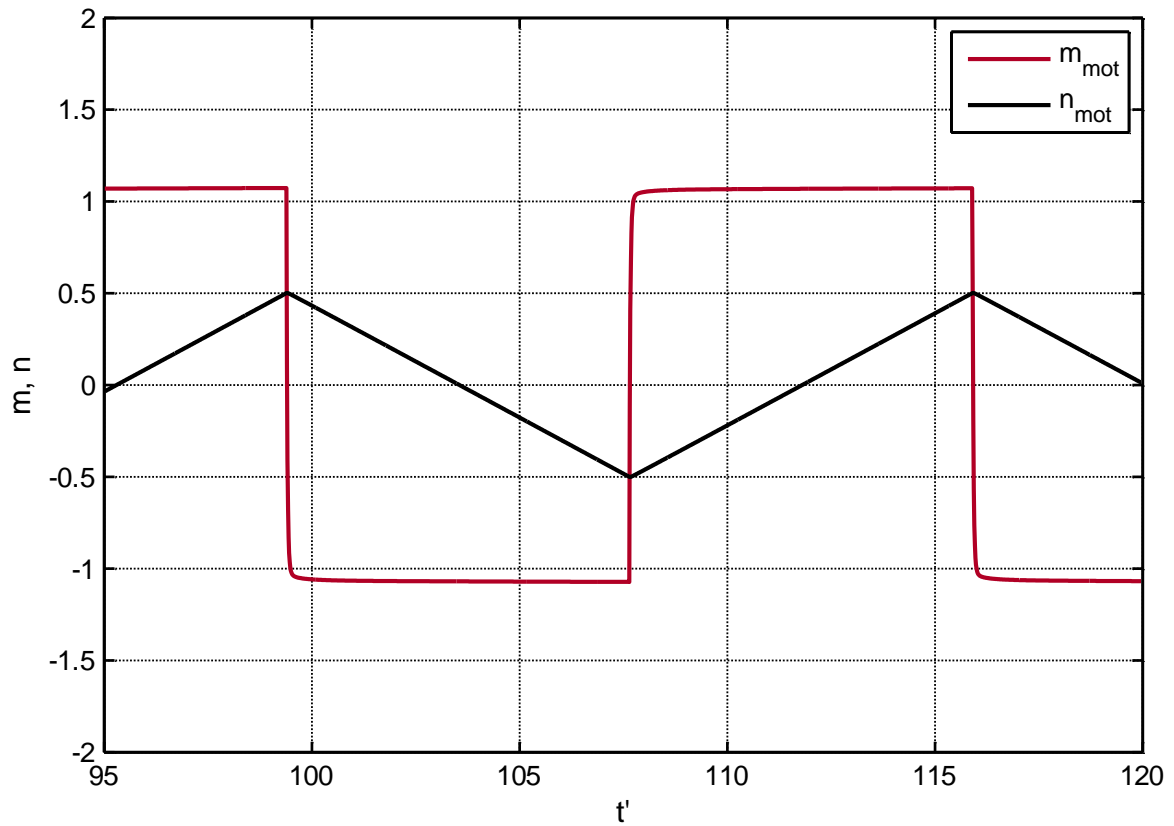
g) Zeitliche Verläufe des Ständerstrombetrages  $|\underline{i}_1(t)|$  und des Luftspaltmomentes  $m(t)$



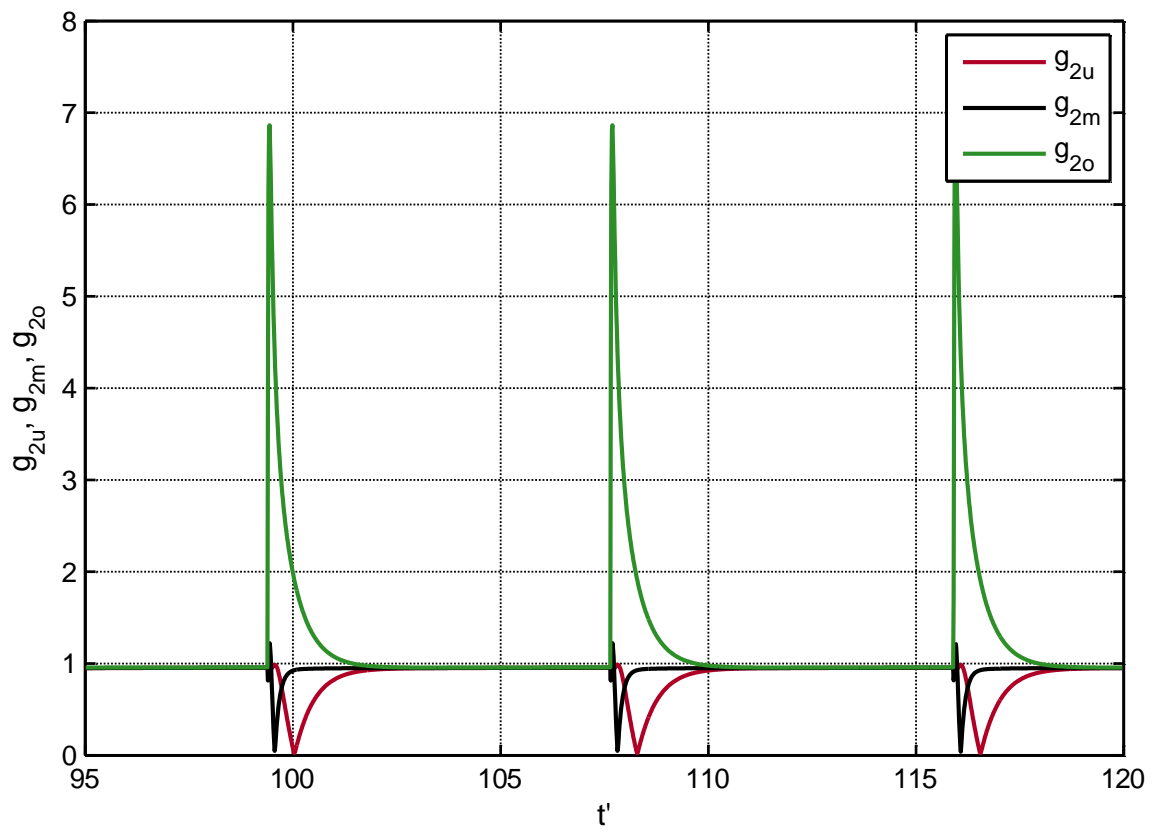
h) Zeitliche Verläufe der drehmoment- und der flussbildenden Ständerstromkomponenten  $i_{1y}(t)$  und  $i_{1x}(t)$

Bilder 7a – 7f:

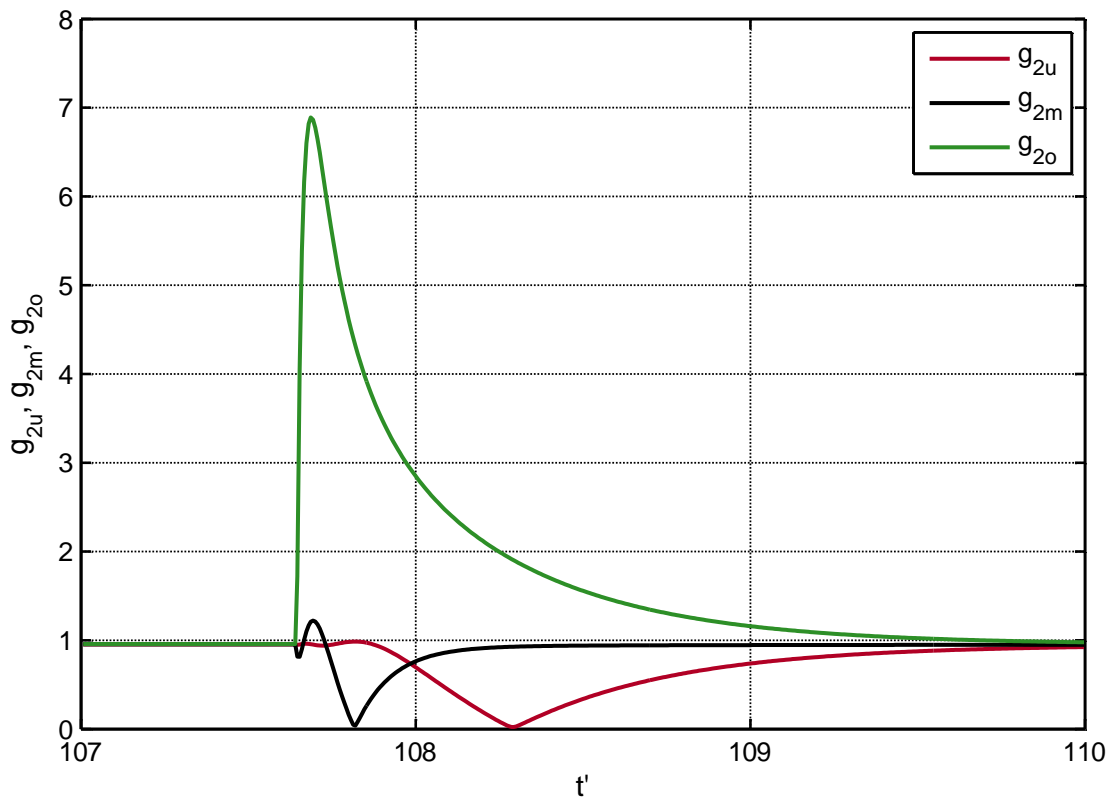
Verhalten der feldorientiert geregelten ASM mit Hochstabläufer  
beim periodischen Reversieren mit  
 $m^* = \pm 1.05$  und  $n_u = \pm 0.5$



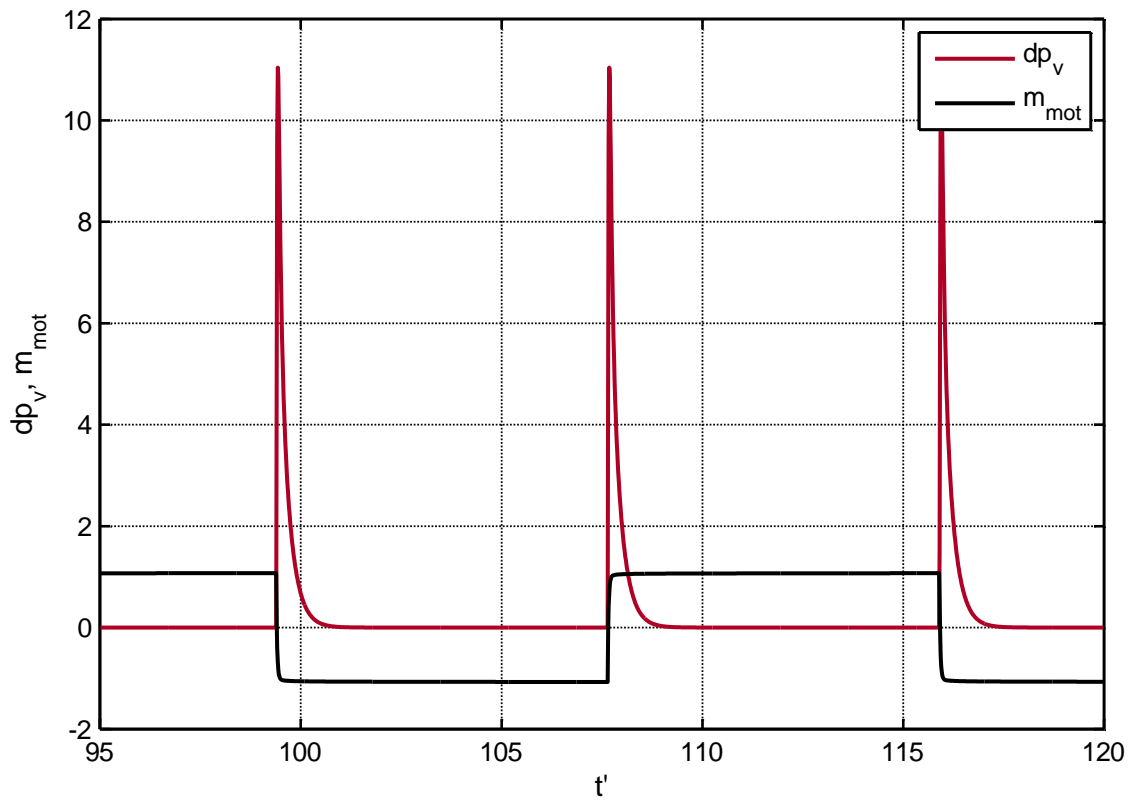
a) Zeitliche Verläufe von Luftspaltmoment  $m(t)$  und Drehzahl  $n(t)$



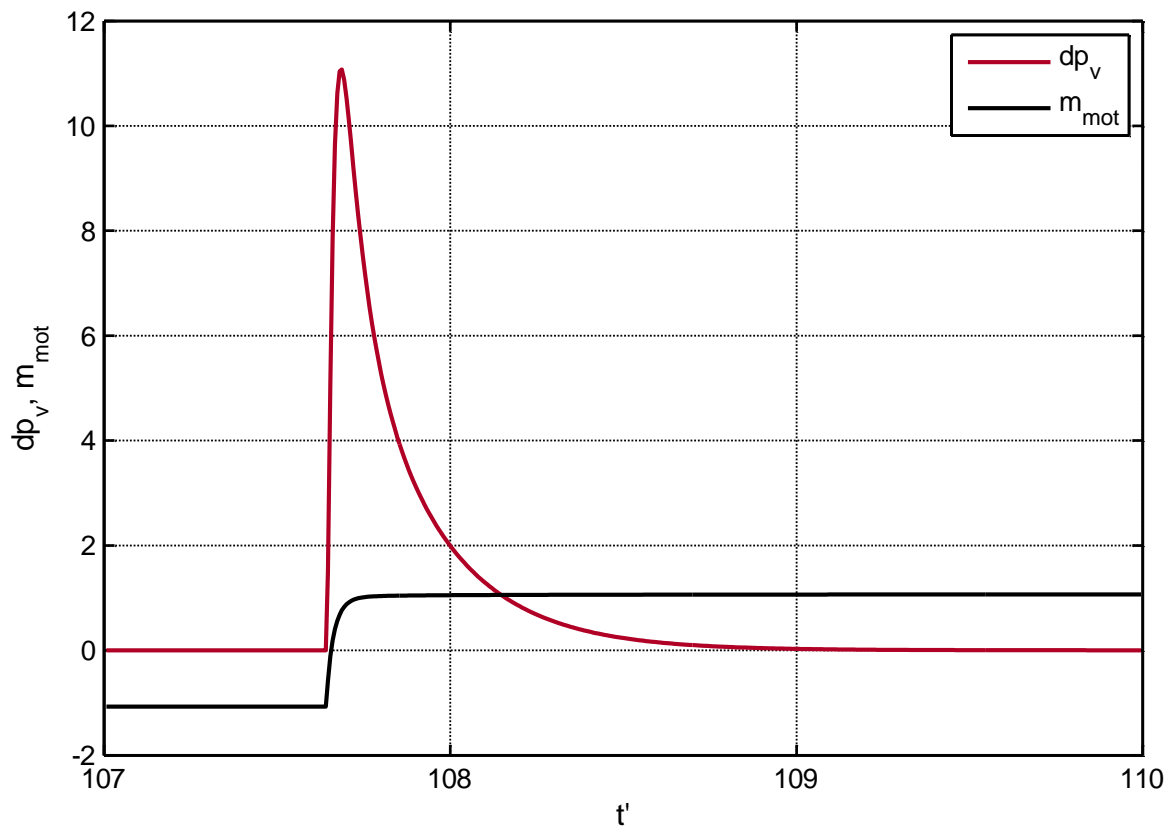
b) Zeitliche Verläufe der Stromdichten  
im untersten, mittleren und obersten Teilstab  $g_{2u,m,o}(t)$



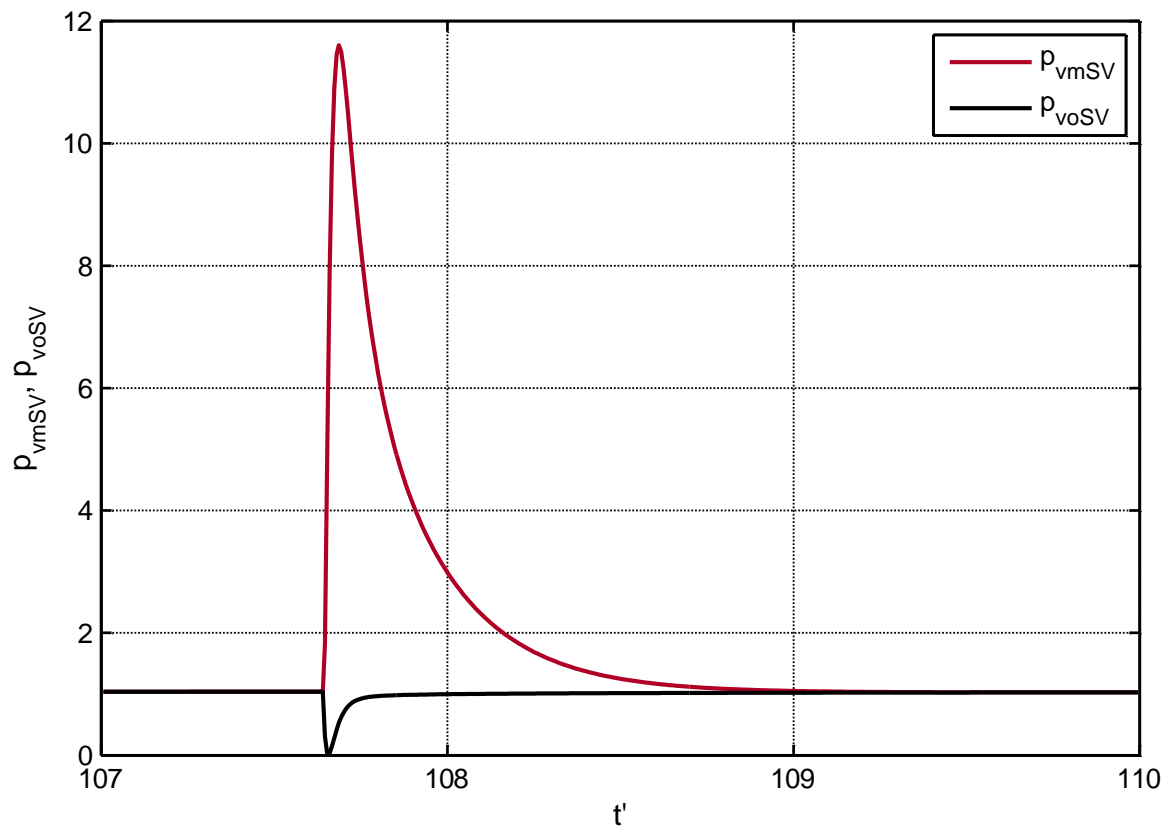
c) Zeitliche Verläufe der Stromdichten  
im untersten, mittleren und obersten Teilstab  $g_{2u,m,o}(t)$   
gezoomt



d) Zeitliche Verläufe der zusätzlichen Läuferstromwärmeverluste infolge transientser Stromverdrängung  $\Delta p_v(t) = p_{vm}(t) - p_{v0}(t)$  und des Luftspaltmomentes  $m(t)$



e) Zeitliche Verläufe der zusätzlichen Läuferstromwärmeverluste  
infolge transientser Stromverdrängung  $\Delta p_v(t) = p_{vm}(t) - p_{v0}(t)$   
und des Luftspaltmomentes  $m(t)$   
gezoomt



f) Zeitliche Verläufe der Läufer-Stromwärmeverluste mit und ohne Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung  $\text{p}_{\text{vm}}(t)$  und  $\text{p}_{\text{v0}}(t)$

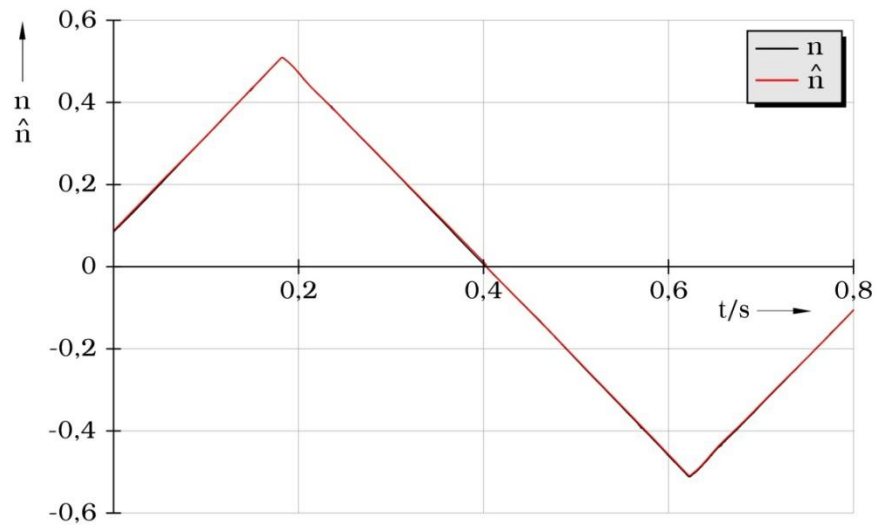
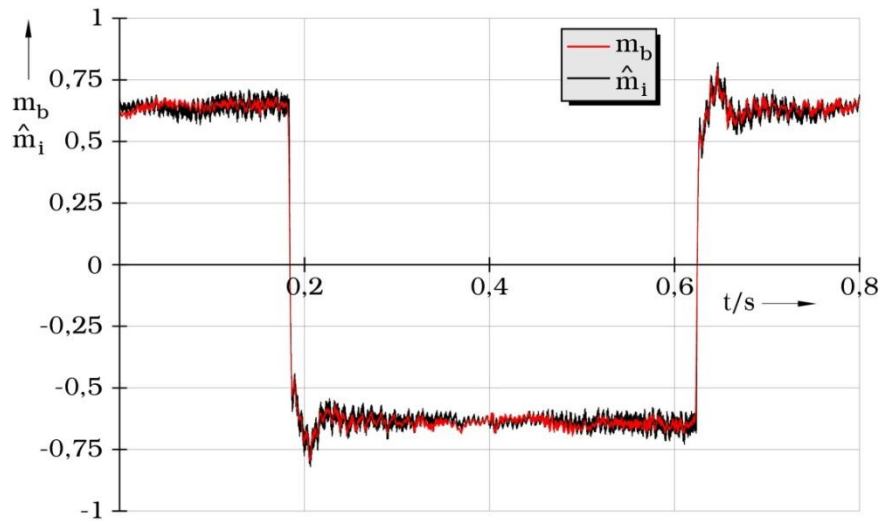


Bild 8: Periodisches Reversieren mit  $m^* = \pm 0.63$  und  $n_U = \pm 0.5$

- Gegenüberstellung von geschätztem Luftspaltmoment  $\hat{m}_t$  und Beschleunigungsmoment  $\hat{m}_b(t)$
- Gegenüberstellung von gemessener  $n(t)$  und aus  $\hat{m}_i$  berechneter Drehzahl  $\hat{n}_t$

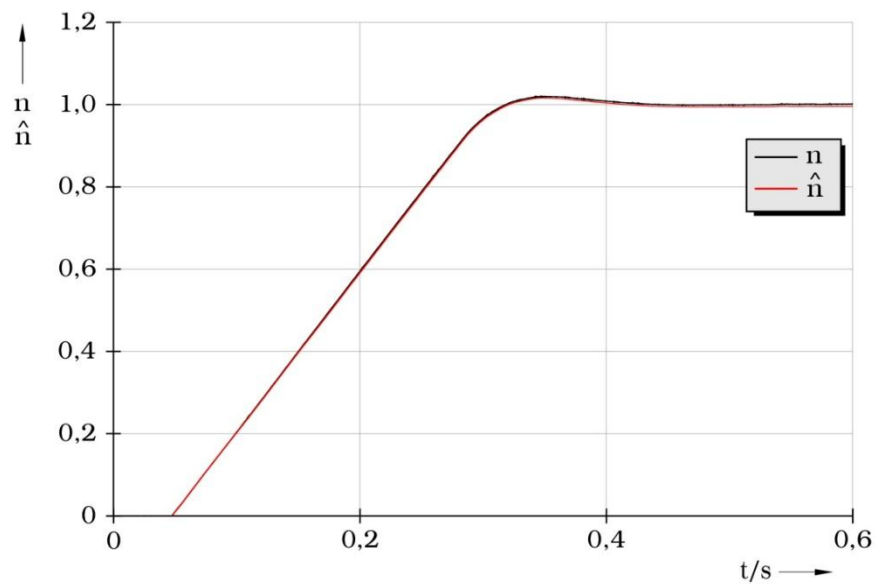
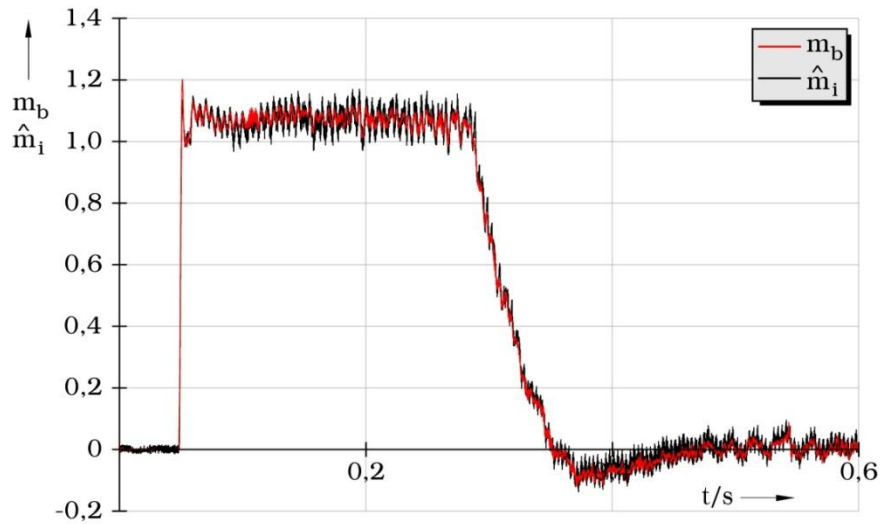


Bild 9: Anlaufvorgang: ASM in FOR:  $n^* = 0$  und  $n^* = 1$

- a) Gegenüberstellung von geschätztem Luftspaltmoment  $\hat{m}_t$  und Beschleunigungsmoment  $\hat{m}_b(t)$
- b) Gegenüberstellung von gemessener  $n(t)$  und aus  $\hat{m}_i$  berechneter Drehzahl  $\hat{n}_t$