

Dynamisches Verhalten der doppelt-gespeisten Asynchronmaschine mit Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer

Ulrich Beckert; Peter Stupin

Zusammenfassung

Die doppelt-gespeiste Asynchronmaschine (DGAM) stellt eine wichtige Form des drehzahlvariablen Generators dar. Bei DGAM großer Leistung ähneln die Leiterquerschnitte der Läuferwicklung zunehmend den Hochstäben von Kurzschlussläuferasynchronmotoren. Bei Netzstörungen mit kurzschlussähnlichen Ausgleichsvorgängen tritt in den Leitern der Läuferwicklung starke Stromverdrängung auf, die das dynamische Betriebsverhalten wesentlich beeinflusst. Im Beitrag wird ein dynamisches Modell der DGAM mit Berücksichtigung der Stromverdrängung vorgestellt und damit das dynamische Verhalten bei Netzstörungen untersucht.

Dynamic Behaviour of the Double-Fed Asynchronous Machine under Consideration of Skin Effect in the Rotor

Ulrich Beckert; Peter Stupin

Abstract

The double-fed induction generator (DFIG) represents an important form of variable speed generators. The conductor cross sections of the rotor windings in high power DFIG are more and more similar to those in deep-bar squirrel cage induction machines. During mains incidents with short-circuit-like transient processes intensive skin effect will occur in the conductors of the rotor windings, which will significantly influence the dynamic operational behaviour. In the paper the dynamic model of the DFIG under consideration of skin effect is represented and the dynamic behaviour during mains incidents is investigated.

Dynamisches Verhalten der doppelt-gespeisten Asynchronmaschine mit Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer

Ulrich Beckert, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Elektrotechnik
Peter Stupin, VEM Sachsenwerk GmbH Dresden

Herrn Prof. Dr. sc. techn. Dr. h.c. P.-K. Budig zum 75. Geburtstag gewidmet

1 Einleitung

Die doppelt-gespeiste Asynchronmaschine (DGAM) stellt eine interessante Alternative zur umrichter-gespeisten Synchronmaschine beim Einsatz als drehzahlvariabler Generator (z.B. für Windkraftanlagen) dar. Während bei der Lösung mit der Synchronmaschine die gesamte Leistung über den Umrichter fließt, braucht bei der DGAM der im Läuferkreis liegende Frequenzumrichter nur die Läufer-scheinleistung zu liefern. **Bild 1** zeigt die Grundstruktur dieses Generatorkonzeptes. **Bild 2** zeigt den Leistungsfluss im über-synchronen und unter-synchronen generatorischen Betrieb. Die Läufer-scheinleistung ist dem Schlupf

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

($n_s = f_1 / p =$ synchrone Drehzahl, $p =$ Polpaarzahl) proportional und beträgt deshalb nur einen Bruchteil der Ständerleistung, wenn man sich auf einen schmalen Drehzahlbereich um die Synchron-drehzahl beschränkt.

Die DGAM bietet außerdem den Vorteil, dass im generatorischen Betrieb Wirk- und Blindleistung unabhängig voneinander und entkoppelt von der Drehzahl geregelt werden können [1...5]. Hierbei erfolgt die gesamte Regelung in einem mit dem Ständer-flussraumzeiger rotierenden Koordinatensystem.

Während die feldorientierte Regelung der DGAM heute weitgehend Stand der Technik ist, ist das dynamische Verhalten der DGAM bei Netzstörungen nur unbefriedigend gelöst: Bei DGAM großer Leistung (1.5 ... 5 MW) ähneln die Leiterquerschnitte der Läuferwicklung zunehmend den Hochstäben von Kurzschlussläuferasynchronmoto-

ren großer Leistung. Es ist davon auszugehen, dass bei kurzschlussähnlichen Ausgleichsvorgängen starke Stromverdrängung in den Leitern der Läuferwicklung auftritt und dass diese Stromverdrängung das dynamische Betriebsverhalten wesentlich beeinflusst.

Im Beitrag wird zunächst ein dynamisches Modell der DGAM mit Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer entwickelt. Anschließend wird mit diesem Modell das dynamische Verhalten der DGAM bei Netzstörungen untersucht.

2 Modell der stromverdrängungsfreien Asynchronmaschine

Während des normalen feldorientiert geregelten Betriebes bleibt die Läuferfrequenz klein, in den Läuferstäben tritt nur geringe Stromverdrängung auf (**Bild 3**). Allen Arbeiten zur FOR der DGAM (vergl. [1...5]) liegt deshalb das Modell der stromverdrängungsfreien Asynchronmaschine mit Schleifringläufer zugrunde. Unter den üblichen idealisierenden Annahmen eines vollkommen symmetrischen Aufbaus der Maschine (**Bild 4**), eines sinusförmigen Luftspaltfeldes, eines konstanten Sättigungszustandes sowie unter Vernachlässigung der Stromverdrängung und der Eisenverluste wird dieses Modell durch folgendes Gleichungssystem im ständerbezogenen Koordinatensystem (α, β) beschrieben [6, 8]:

$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \underline{\dot{\psi}}_1 = \underline{u}_1 - R_1 \underline{i}_1 \quad (2)$$

$$\frac{d\underline{\psi}_2}{dt} = \underline{\dot{\psi}}_2 = \underline{u}_2 - R_2 \underline{i}_2 + j n \underline{\psi}_2 \quad (3)$$

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

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

$$m_i = \underline{\psi}_1 \times \underline{i}_1 = \frac{X_h}{X_2} (\underline{\psi}_2 \times \underline{i}_1) \quad (6)$$

$$\frac{dn}{dt} = \dot{n} = \frac{1}{T_A} (m_i - m_w) \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} X_1 &= X_h + X_{\sigma 1} \\ X_2 &= X_h + X_{\sigma 2} \end{aligned} \quad (8)$$

die Ständer- und Läuferreaktanzen, X_h die Hauptfeldreaktanz und $X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$ die Ständer- und Läuferstreureaktanzen. Für die verwendeten komplexen Raumzeiger gilt die Definition nach KOVACS [7].

Für den Ständerstromraumzeiger gilt z.B.:

$$\underline{i}_1 = \frac{2}{3} \left(i_{1a}(t) + \underline{a} i_{1b}(t) + \underline{a}^2 i_{1c}(t) \right) = i_{1\alpha} + j i_{1\beta} \quad , \quad (9)$$

wobei i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} die Augenblickswerte der Ständerstrangströme und $\underline{a} = e^{j^{2\pi/3}}$ sind.

Ohne besondere Kennzeichnung sind alle Läufergrößen unter Benutzung des reellen Übersetzungsverhältnisses

$$\underline{u} = \frac{w_1 \xi_{1,1}}{w_2 \xi_{2,1}} \quad (10)$$

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

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

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

$$T_A = \omega_B \frac{J \omega_B / p}{M_B} \quad (12)$$

ist die bezogene Anlaufzeitkonstante, die man bei der Normierung der Bewegungsgleichung erhält. J ist das Gesamtträgheitsmoment und p die Polpaarzahl.

3 Berücksichtigung der Stromverdrängung

Im dynamischen Betrieb, besonders bei kurzschlussähnlichen Ausgleichsvorgängen, tritt in den Leitern der Läuferwicklung starke transiente Stromverdrängung auf. Sie beeinflusst das dynamische Betriebsverhalten der DGAM wesentlich.

Bei der Berücksichtigung der Stromverdrängung wird im Folgenden vorausgesetzt, dass die Läuferwicklung eine ungesehnte Zweischicht-Stabwicklung ist, so dass in jeder Läufernut zwei vom gleichen Strangstrom durchflossene Rechteckstäbe übereinander liegen (**Bild 5**). Im Unterstab tritt einseitige, im Oberstab zweiseitige Stromverdrängung auf (**Bild 3**). Für den stationären Betrieb, bei dem die Läuferströme zeitlich sinusförmig verlaufen, wurde das Problem schon früh gelöst. Der Einfluss der Stromverdrängung auf das stationäre Betriebsverhalten wird üblicherweise durch frequenzabhängige Stabwiderstände und frequenzabhängige Nutstreuinduktivitäten beschrieben [9]. Im dynamischen Betrieb versagt dieses auf der Annahme eines sinusförmigen Stabstromes beruhende Verfahren, weil im dynamischen Betrieb von einem beliebigen zeitlichen Verlauf der Läuferströme ausgegangen werden muss.

Im Folgenden wird eine von Fürsich [10] für Käfigläuferasynchronmotoren entwickelte Theorie für Schleifringläuferasynchronmaschinen mit einer Zweischicht-Stabwicklung weiterentwickelt:

Einführend soll zunächst der Fall betrachtet werden, dass Unter- und Oberstab stromverdrängungsfrei sind. In diesem Fall gilt für die Augenblickswerte der Nutstreuflussverkettungen des Unter- und des Oberstabes

$$\Psi_{\sigma nu} = l_{\sigma nu} i_{Stu} + l_{\sigma nu o} i_{Sto} \quad (13)$$

$$\Psi_{\sigma no} = l_{\sigma no} i_{Sto} + l_{\sigma no u} i_{Stu} , \quad (14)$$

wobei mit den Bezeichnungen nach Bild 5 für die Selbst- und Gegeninduktivitäten des Nutstreuflusses gilt:

$$l_{\sigma nu} = \mu_0 l_{Fe} \left[\frac{1}{3} \frac{h_{St}}{b_n} + \frac{d}{b_n} + \frac{h_{St}}{b_n} + \frac{a}{b_n} \right] \quad (15)$$

$$l_{\sigma_{no}} = \mu_0 l_{Fe} \left[\frac{1}{3} \frac{h_{St}}{b_n} + \frac{a}{b_n} \right] \quad (16)$$

$$l_{\sigma_{nou}} = l_{\sigma_{nuo}} = \mu_0 l_{Fe} \left[\frac{1}{2} \frac{h_{St}}{b_n} + \frac{d}{b_n} + \frac{h_{St}}{b_n} + \frac{a}{b_n} \right] \quad (17)$$

Berücksichtigt man, dass ein Unter- und ein Oberstab eine Spule bilden, also vom gleichen Strangstrom durchflossen werden

$$i_{Stu} = i_{Sto} = i_2 \quad (18)$$

und dass je Läuferstrang $w_2 = N_2 / 3$ ($N_2 =$ Läufernutzahl) Spulen in Reihe geschaltet sind, so gilt für die Nutstreifflussverkettung eines Läuferstranges

$$\Psi_{\sigma_{n2}} = w_2 \Psi_{\sigma_{nSp}} = w_2 (\Psi_{\sigma_{nu}} + \Psi_{\sigma_{no}}) = L_{\sigma_{n2}} i_2 \quad , \quad (19)$$

wobei

$$L_{\sigma_{n2}} = w_2 (l_{\sigma_{nu}} + 2l_{\sigma_{nou}} + l_{\sigma_{no}}). \quad (20)$$

Nach Umrechnung auf den Ständer und Normierung erhält man schließlich für die Läufernutstreifflussverkettung ohne Stromverdrängung

$$\underline{\Psi}_{\sigma_{n2}} = X_{\sigma_{n2}} \underline{i}_2 \quad (21)$$

mit der Nutstreureaktanz

$$X_{\sigma_{n2}} = \ddot{u}^2 \frac{\omega_{ln} L_{\sigma_{n2}}}{R_B} \quad (22)$$

(\ddot{u} = Übersetzungsverhältnis, s. Gl. 10).

Tritt in den Unter- und Oberstäben Stromverdrängung auf, so lässt sich die Nutstreifflussverkettung auf ähnliche Weise beschreiben, indem man die sich über den Stabhöhen von Unter- und Oberstab einstellende Stromdichteverteilung durch eine Treppenkurve annähert. Dies entspricht der fiktiven Unterteilung von Unter- und Oberstab in je n übereinander liegende stromverdrängungsfreie Teilstäbe gemäß **Bild 5**. Auf diese Weise entsteht das Modell einer Asynchronmaschine mit $2n$ Drehstromwicklungen im Läufer, die über das Hauptfeld und das Nutstreufeld magnetisch und über gemeinsame Stirnverbindungen galvanisch gekoppelt sind.

Für den Augenblickswert der Nutstreifflussverkettung des allgemein i-ten Teilstabes gilt dann

$$\Psi_{\sigma n i} = \sum_{k=1}^{2n} l_{\sigma n k, i} i_{2k} , \quad (23)$$

wobei für die Selbst- und Gegeninduktivitäten des Nutstreifflusses

$$l_{\sigma n i, i} = \mu_0 l_{Fe} \left[\frac{1}{3} \frac{h_i}{b_n} + \frac{d}{b_n} + \sum_{j=i+1}^{2n} \frac{h_j}{b_n} + \frac{a}{b_n} \right] \quad (24)$$

$$l_{\sigma n k, i} = \mu_0 l_{Fe} \left[\frac{1}{2} \frac{h_i}{b_n} + \frac{d}{b_n} + \sum_{j=i+1}^{2n} \frac{h_j}{b_n} + \frac{a}{b_n} \right] \quad \text{für } k < i \quad (25)$$

$$l_{\sigma n i, k} = l_{\sigma n k, i} \quad (26)$$

gilt. Für $i > n$ entfällt der Term d/b_n , s. **Bild 5**. Außerdem sind zu jedem Zeitpunkt die Summen der Teilströme des Unter- und des Oberstabes gleich dem Läuferstrom:

$$\sum_{k=1}^n i_{2k} = \sum_{k=n+1}^{2n} i_{2k} = i_2 \quad (27)$$

Über die Nutstreifflussverkettung der allgemein i-ten Teilspule, gebildet aus je einem Teilstab des Unter- und des Oberstabes,

$$\Psi_{\sigma n Sp i} = \Psi_{\sigma n j} + \Psi_{\sigma n l} = \sum_{k=1}^{2n} (l_{\sigma n k, j} + l_{\sigma n k, l}) i_{2k} \quad (28)$$

erhält man analog zu Gln. (19) bis (22) für die Nutstreifflussverkettung der i-ten Teilwicklung des Läufers in normierter Form:

$$\underline{\Psi}_{\sigma n 2 i} = \sum_{k=1}^{2n} X_{\sigma n k, i} \underline{i}_{2k} , \quad \text{für } i = 1 \dots 2n \quad (29)$$

wobei

$$X_{\sigma n k, i} = \ddot{u}^2 \omega_{1n} w_2 (l_{\sigma n k, j} + l_{\sigma n k, l}) / R_B . \quad (30)$$

Die gesamte Flussverkettung der i-ten Teilwicklung des Läufers setzt sich aus Haupt- und Streifflussverkettung zusammen:

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

In der Läuferstreureaktanz

$$X_{\sigma 2 \text{ red}} = X_{\sigma 2} - X_{\sigma n 2} \quad (32)$$

ist jetzt im Gegensatz zu Gl.(8) der Nutstreuanteil, der wegen der Stromverdrängung gesondert behandelt wird, nicht mehr enthalten.

Anstelle einer Läuferspannungsdifferentialgleichung (3) im stromverdrängungsfreien Fall erhält man jetzt 2n Differentialgleichungen:

$$\frac{d \underline{\psi}_{2i}}{dt} = \underline{u}_2 - (R_{Stj} \dot{i}_{2j} + R_{St1} \dot{i}_{21} + R_R \dot{i}_2) + j n \underline{\psi}_{2i} \quad (33)$$

Dabei addieren sich die Raumzeiger der Teilströme im Unter- und Oberstab jeweils zum gesamten Läuferstromraumzeiger:

$$\sum_{k=1}^n \dot{i}_{2k} = \sum_{k=n+1}^{2n} \dot{i}_{2k} = \dot{i}_2 \quad (34)$$

In Gl.(33) bezeichnen R_{Stj} den ohmschen Widerstand des j-ten Teilstabes und R_R den stromverdrängungsfreien Stirnanteil des Läuferwiderstandes.

Die Gln. (2), (33), (4), (31), (34), (6) und (7) beschreiben in ihrer Gesamtheit das dynamische Verhalten der DGAM mit Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer. Bei der Anschrift der Bewegungsgleichung (7) ist hier der einfachste Fall des Einmassendrehenschwingers zugrunde gelegt worden. Für die Integration des Differentialgleichungssystems wird zweckmäßig eines der Runge-Kutta-Verfahren gewählt.

4 Simulationsprogramm und Ergebnisse

Die dargestellte Theorie wurde in ein Simulationsprogramm umgesetzt.

Eingangsgrößen des Programms sind die Maschinendaten, die gewünschte Unterteilung von Unter- und Oberstäben, die Daten des mechanischen Systems (Trägheitsmomente, Feder- und Dämpfungskonstanten, Spiel), die Netzdaten, der Betriebsfall und die Simulationsparameter (Endzeit, Schrittweite).

Die Simulation folgender Betriebsfälle ist möglich: Netz-Anlauf, Wiedereinschalten mit Restfluss, drei- und zweipoliger Kurzschluss, Netzspannungseinbruch, Frequenz-Anlauf sowie feldorientiert geregelter Betrieb.

Wegen der Berücksichtigung der Stromverdrängung sind neben den Maschinennennendaten sowie den Haupt- und Streureaktanzen und den Widerständen der Wicklungen noch weitere detaillierte Maschinendaten, wie z.B. die Läufernutgeometrie, erforderlich. Ausgehend vom mechanischen Antriebsstrang einer Windkraftanlage kann das mechanische System maximal ein Sechsmassendrehchwinger sein, der ein Spielelement enthält. Der zeitliche Verlauf des Widerstands- bzw. Antriebsmomentes wird durch eine Summe aus zwei Konstanten, zwei drehwinkelabhängigen, drei winkelgeschwindigkeitsabhängigen und bis zu sechs periodischen Komponenten dargestellt:

$$m_w = m_{w_{akt}} + m_{w_{pas}} + c_1 \vartheta_A + c_2 \vartheta_A^2 + k_1 \omega_A + k_2 \omega_A^2 + k_3 \omega_A^3 + \sum_{k=1}^6 \hat{m}_{w,k} \sin(\omega_{A,k} t + \varphi_{A,k}) \quad (35)$$

Alle interessierenden Systemgrößen können auf Wunsch graphisch ausgegeben werden.

Den dargestellten Ergebnissen liegen folgende zwei VEM-Windkraftgeneratoren zugrunde:

$$\begin{array}{llllll} 3700 \text{ kW}; & 50 \text{ Hz}; & 2p = 4; & 3300 \text{ V}; & 628 \text{ A}; & 1800 \text{ min}^{-1} \\ 1545 \text{ kW}; & 60 \text{ Hz}; & 2p = 6; & 575 \text{ V}; & 1509 \text{ A}; & 1440 \text{ min}^{-1} \end{array}$$

Bild 6 zeigt nochmals den Vorteil der DGAM. Dargestellt ist die erforderliche Umrichter-scheinleistung S_2 (bezogen auf die Ständernennscheinleistung S_{1n}) in Abhängigkeit vom Schlupf (Gl. 1) bei generatorischem Betrieb der DGAM mit Nennwirkleistung für unterschiedliche Werte der dabei zu erzeugenden Blindleistung. $Q_1 = 1$ entspricht dem Betrieb mit Nennblindleistung, $Q_1 = 0$ dem mit dem Leistungsfaktor 1 und $Q_1 = -1$ dem Betrieb mit kapazitiver Blindleistung vom Betrag der Nennblindleistung.

Bild 7 zeigt die zeitlichen Verläufe des Luftspaltmomentes, der Drehzahl, des Ständer- und des Läuferstrombetrages sowie die Beträge der Teilstabströme im Ober- und im Unterstab bei einem Netzanlauf mit festem Läuferzusatzwiderstand gegen ein Widerstandsmoment $m_w = c_2 n^2$. Unter dem Ständerstrombetrag (Gl. 9) ist der Betrag des Ständerstrom-raumzeigers

$$i_1 = |\dot{i}_1| = \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2} \quad (36)$$

zu verstehen. Die Beträge der Teilstabströme sind analog definiert. Das Luftspaltmoment baut sich dabei in Form einer gedämpften Schwingung mit etwa Netzfrequenz auf. Die Spitzenwerte der Drehmomentschwingung erreichen etwa das 3,5fache des Nennmomen-

tes. Das Einlaufen in den stationären Endwert erfolgt in einer niederfrequenten gedämpften Schwingung. Gegenüber dem stationären Betrieb ist das Kippmoment herabgesetzt. Der Anlaufstrom beträgt das knapp 6fache des Nennstromes. Zur Erfassung der Stromverdrängung waren Unter- und Oberstab in je 5 Teilstäbe gleicher Höhe unterteilt worden. Die **Bilder 7d** und **7e** lassen die starke Stromverdrängung im Ober- und Unterstab während des Anlaufvorganges erkennen. Dargestellt sind jeweils die Strombeträge im untersten, mittleren und obersten Teilstab.

Bild 8 zeigt die entsprechenden Systemgrößen bei einem Netzspannungseinbruch, einem wichtigen kritischen Betriebszustand. Dargestellt ist der Fall, dass die Netzspannung ausgehend von $u_1 = 100\%$ für die Dauer von 1s um $\Delta u_1 = 50\%$ einbricht. Das Antriebsmoment ist dabei als konstant gleich Nennmoment angenommen worden. Die **Bilder 8e** und **8f** lassen erkennen, dass auch bei einem Netzspannungseinbruch starke transiente Stromverdrängung im Läufer auftritt, obwohl sich während des Ausgleichsvorganges die Generatordrehzahl nur wenig ändert.

Bild 9 zeigt die zeitlichen Verläufe der Systemgrößen beim dreipoligen Stoßkurzschluss, einem klassischen Prüffeldversuch. Der leerlaufende Generator wird vom Netz getrennt und bei nahezu vollem Restfluss an den Ständerklemmen kurzgeschlossen. Der Spitzenwert des Luftspaltemomentes erreicht etwa das 5fache des Nennmomentes, der Spitzenwert des Kurzschlussstromes mehr als das 9fache des Nennstromes. Erwartungsgemäß tritt auch beim Stoßkurzschluss eine starke transiente Stromverdrängung auf. Eine Gegenüberstellung von berechneten (**9e**) und gemessenen (**9f**) Kurzschlussströmen zeigt eine relativ gute Übereinstimmung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Für eine zuverlässige Vorausberechnung der dynamischen Strom- und Drehmomentbeanspruchungen bei DGAM großer Leistung ist die Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung im Läufer unerlässlich.

Literatur

- [1] Maier, R.: *Blindstrom- und Drehzahlregelung der doppeltgespeisten Drehstrommaschine mit eingepprägten Läuferströmen*. Diss. TH Karlsruhe. 1974
- [2] Albrecht, P.: *Die geregelte doppeltgespeiste Asynchronmaschine als drehzahl-variabler Generator im Netz*. Diss. TU Braunschweig 1984
- [3] Arsudis, D.: *Doppeltgespeister Drehstromgenerator mit Spannungszwischenkreis-Umrichter im Rotorkreis für Windkraftanlagen*. Diss. TU Braunschweig 1989
- [4] Heller, M.: *Die doppeltgespeiste Drehstrommaschine für drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerke*. Diss. TU Braunschweig 1998
- [5] Kelber, C.: *Aktive Dämpfung der doppelt-gespeisten Drehstrommaschine*. Diss. TU Braunschweig 2000
- [6] Pfaff, F.: *Regelung elektrischer Antriebe*. Bd. 1.; R. Oldenbourg Verlag, München-Wien 1994
- [7] Kovacs, K.P.; Racz, I.: *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*. Bd. 1 und Bd. 2
Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 1959
- [8] Zägelein W.: *Drehzahlregelung des Asynchronmotors unter Verwendung eines Beobachters mit geringer Parameterempfindlichkeit*.
Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg 1984
- [9] Vogt, K.: *Berechnung rotierender elektrischer Maschinen*.
Berlin: Verlag Technik 1972
- [10] Fürsich, H.: *Über das Verhalten von Drehstrom-Käfigankermotoren unter Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer*.
Diss. TU München 1974

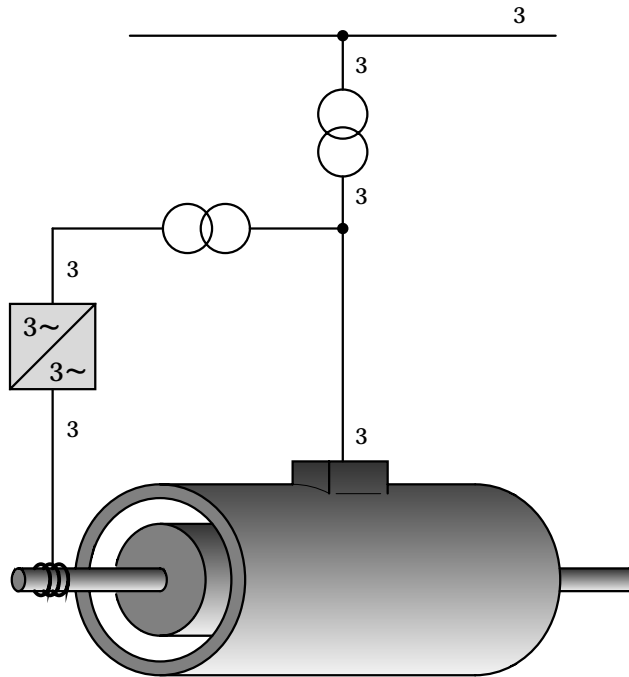


Bild 1: DGAM als drehzahlvariabler Generator

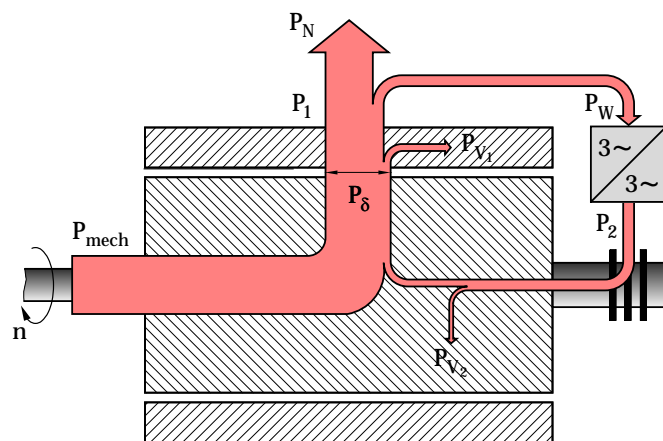
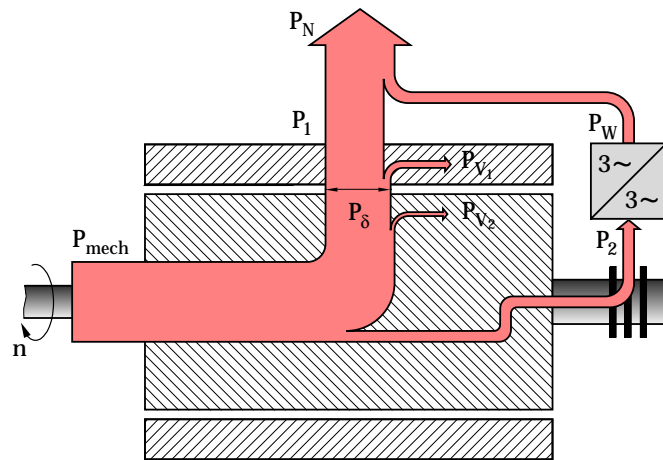


Bild 2: Leistungsfluss im über- und untersynchronen generatorischen Betrieb

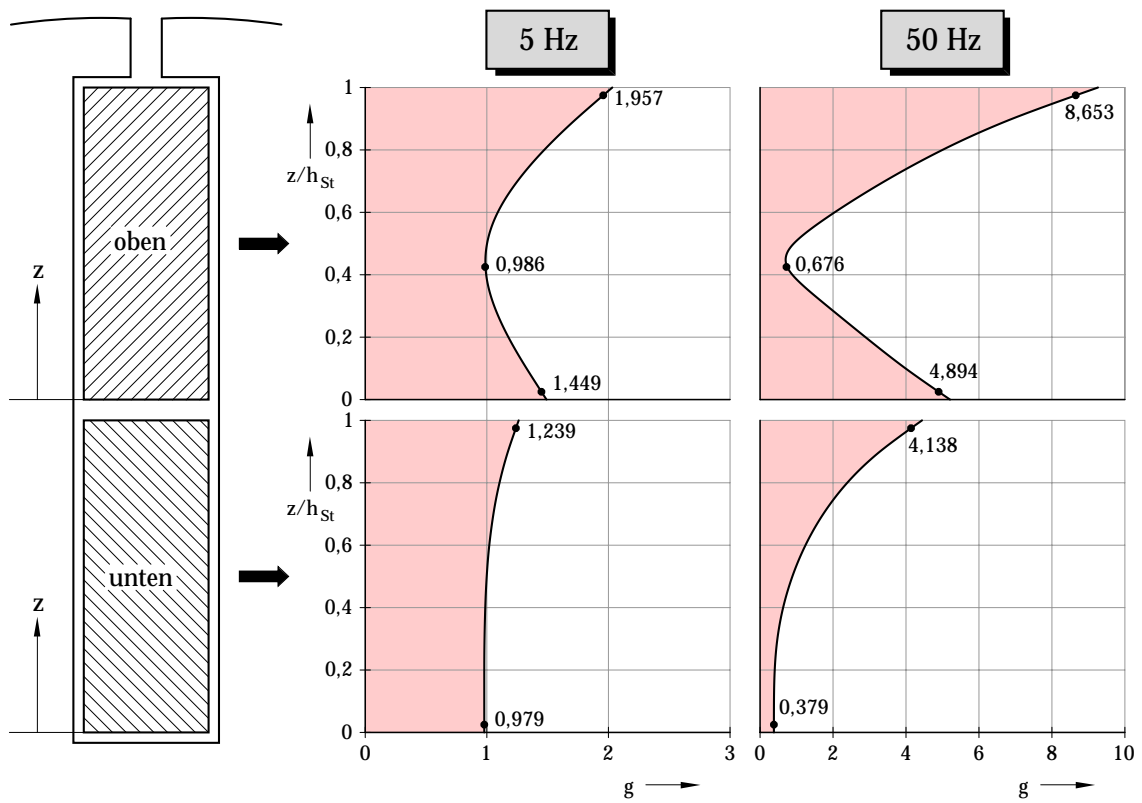


Bild 3: Frequenzabhängige Stromverdrängung in einer Zweischicht-Stabwicklung bei sinusförmigen Läuferstromverlauf
Kupferleiter; Stabhöhe $h_{St} = 30$ mm

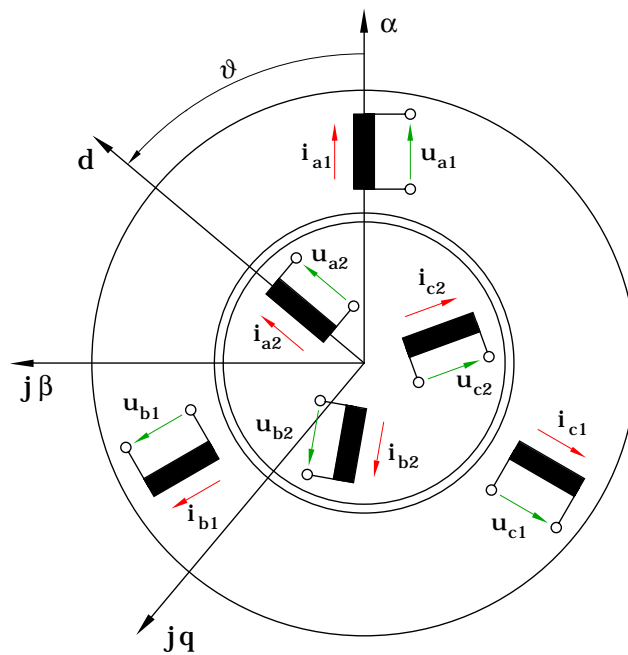


Bild 4: Ersatzbild der Asynchronmaschine

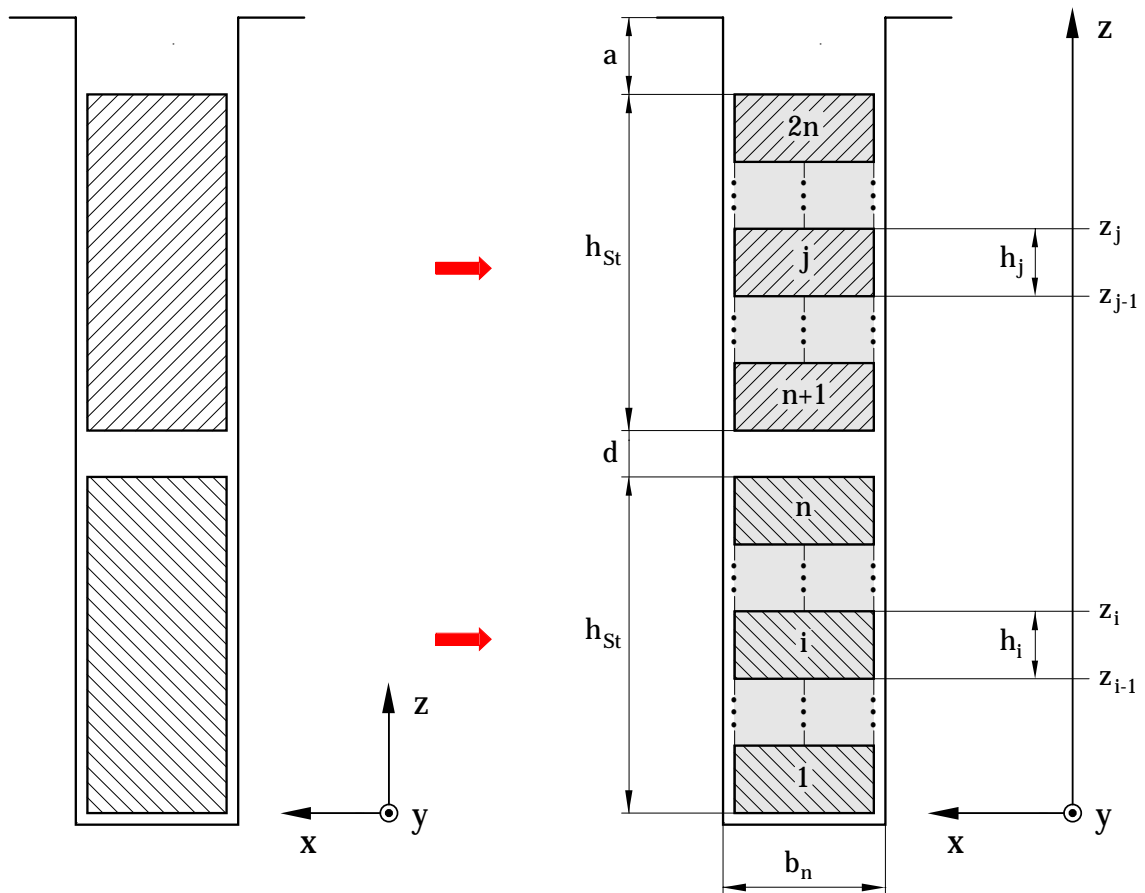


Bild 5: Fiktive Unterteilung von Ober- und Unterstab in je n stromverdrängungsfreie Teilstäbe

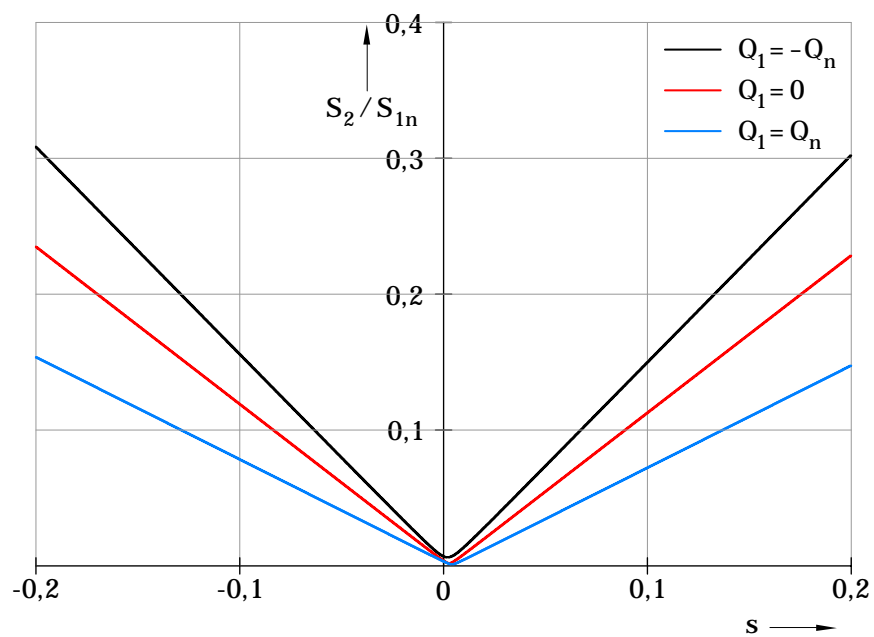


Bild 6: Umrichterscheinleistung als Funktion des Schlupfes bei generatorischem Betrieb mit Nennwirkleistung

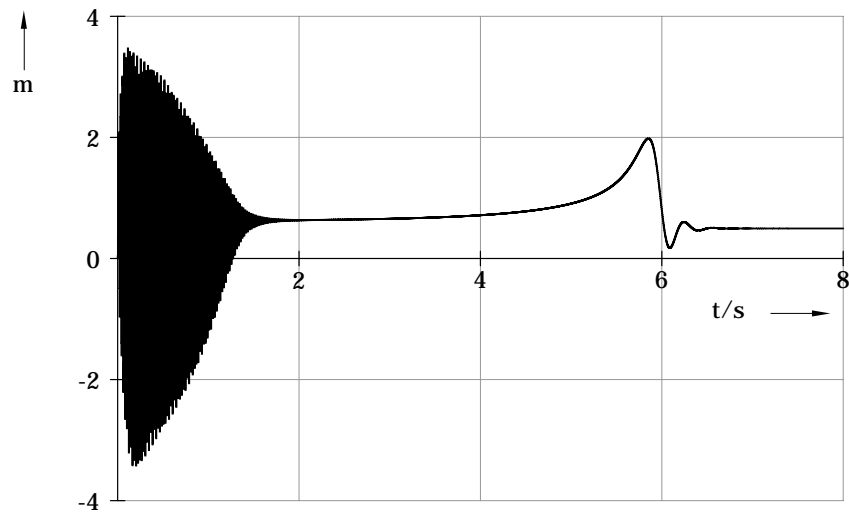


Bild 7a: Lastanlauf

Zeitlicher Verlauf des Luftspaltmomentes

ASM mit Schleifringläufer: 3700 kW; 50 Hz; 3300 V; 749 A

$$J_{\text{ges}} = 2 J_{\text{ASM}}, \quad m_W = c_2 n^2; \quad c_2 = 0.5$$

Zeitlicher Verlauf des Luftspaltmomentes

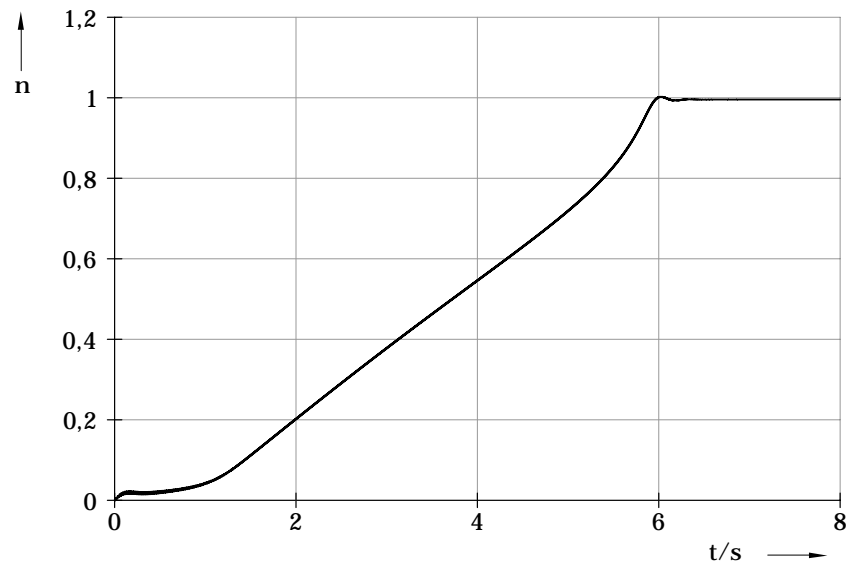


Bild 7b: Lastanlauf

Zeitlicher Verlauf der Drehzahl

ASM mit Schleifringläufer: 3700 kW; 50 Hz; 3300 V; 749 A

$$J_{\text{ges}} = 2 J_{\text{ASM}}, \quad m_W = c_2 n^2; \quad c_2 = 0.5$$

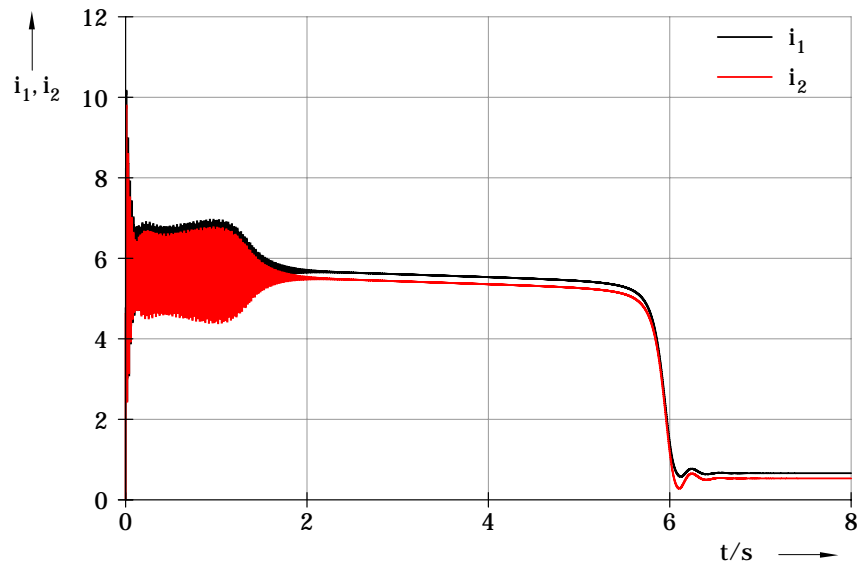


Bild 7c: Lastanlauf

Zeitliche Verläufe des Ständerstrom- und des Läuferstrombetrages

ASM mit Schleifringläufer: 3700 kW; 50 Hz; 3300 V; 749 A

$$J_{\text{ges}} = 2 J_{\text{ASM}}, \quad m_W = c_2 n^2; \quad c_2 = 0.5$$

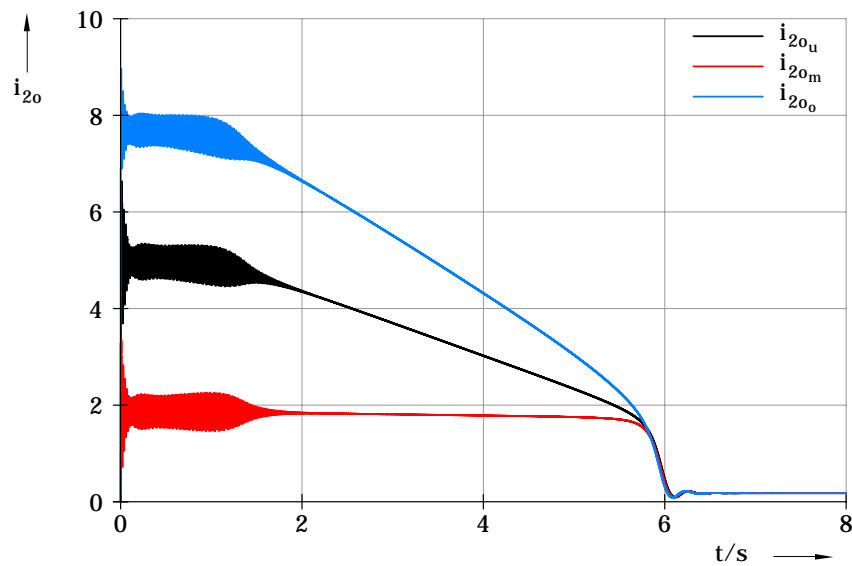


Bild 7d: Lastanlauf

Zeitliche Verläufe des Betrages der Teilströme im Oberstab

ASM mit Schleifringläufer: 3700 kW; 50 Hz; 3300 V; 749 A

$$J_{\text{ges}} = 2 J_{\text{ASM}}, \quad m_W = c_2 n^2; \quad c_2 = 0.5$$

Indices: u, m, o: unterster, mittlerer und oberster Teilstab

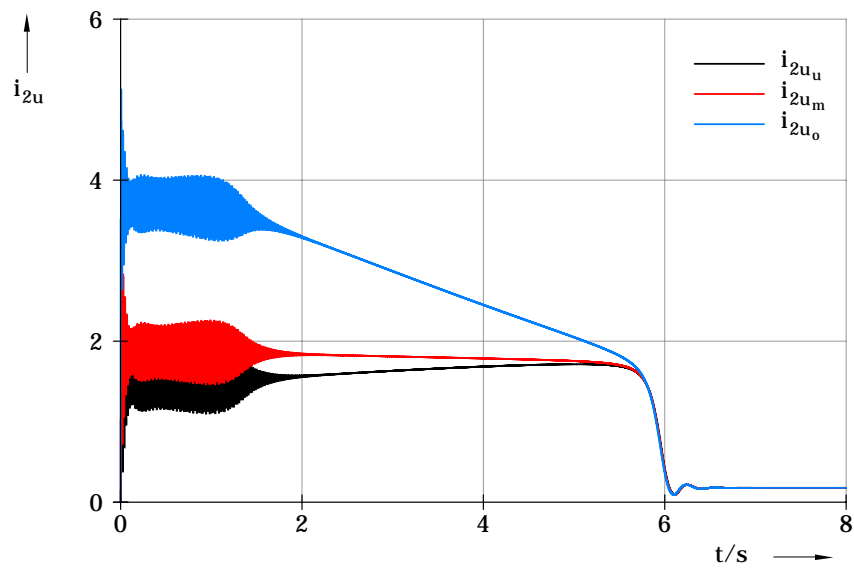


Bild 7e: Lastanlauf

Zeitliche Verläufe des Betrages der Teilströme im Unterstab

ASM mit Schleifringläufer: 3700 kW; 50 Hz; 3300 V; 749 A

$$J_{\text{ges}} = 2 J_{\text{ASM}}, \quad m_W = c_2 n^2; \quad c_2 = 0.5$$

Indices: u, m, o: unterster, mittlerer und oberster Teilstab

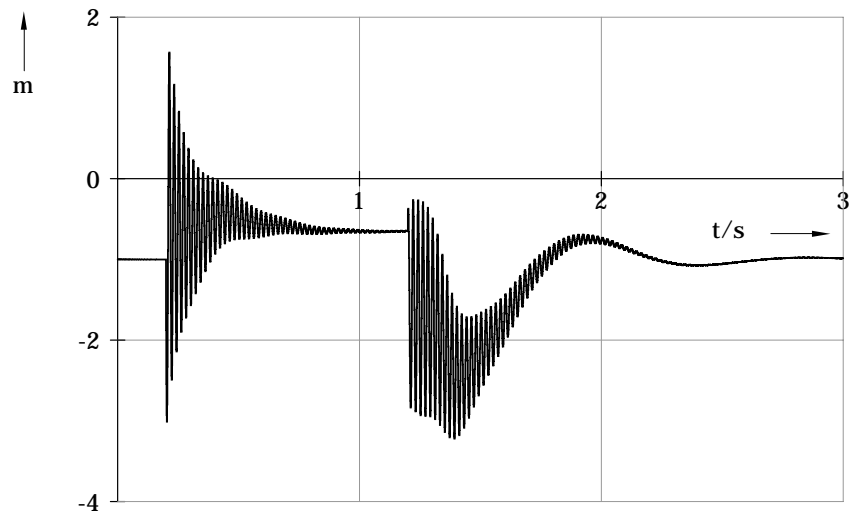


Bild 8a: Netzspannungs-Einbruch:

$$t_{\text{einbr}} = 1\text{s}, \quad u_1(0) = 1.0, \quad \Delta u_1 = 0.5$$

Zeitlicher Verlauf des Luftspaltmomentes

Antriebsmoment $m_A(0) = 1.0 = \text{konst.}$

Zweimassendrehchwinger $J_1 = J_{\text{ASM}}; \quad J_2 = 5 J_1, \quad f_0 = 3.5 \text{ Hz}$

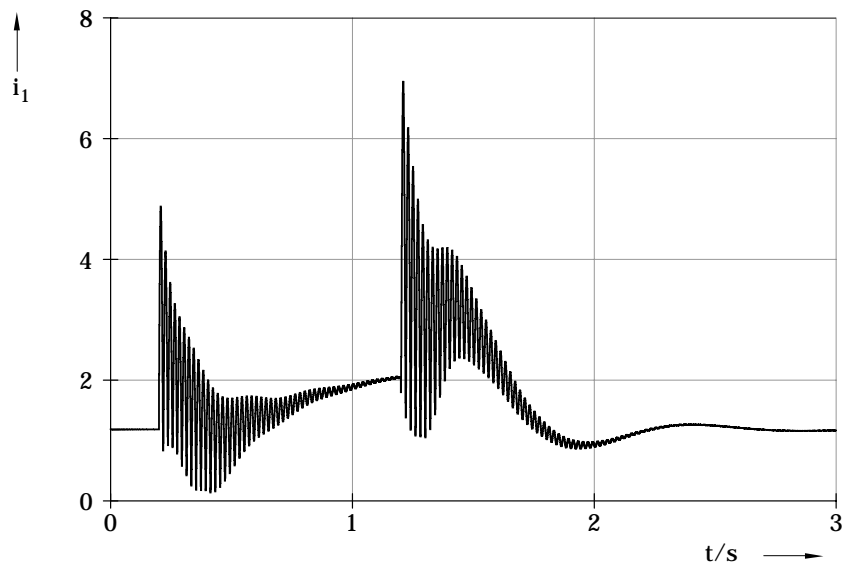


Bild 8b: Netzspannungs-Einbruch:

$$t_{\text{einbr}} = 1\text{s}, \quad u_1(0) = 1.0, \quad \Delta u_1 = 0.5$$

Zeitlicher Verlauf des Ständerstrombetrages

Antriebsmoment $m_A(0) = 1.0 = \text{konst.}$

Zweimassendrehchwinger $J_1 = J_{\text{ASM}}; \quad J_2 = 5 J_1, \quad f_0 = 3.5 \text{ Hz}$

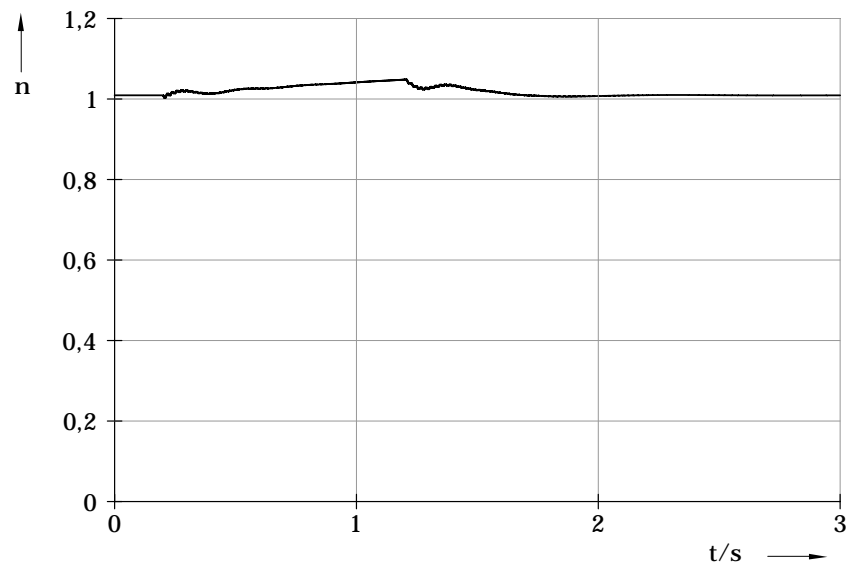


Bild 8c: Netzspannungs-Einbruch:

$$t_{\text{einbr}} = 1\text{s}, \quad u_1(0) = 1.0, \quad \Delta u_1 = 0.5$$

Zeitlicher Verlauf der Drehzahl

Antriebsmoment $m_A(0) = 1.0 = \text{konst.}$

Zweimassendrehchwinger $J_1 = J_{\text{ASM}}; \quad J_2 = 5 J_1, \quad f_0 = 3.5 \text{ Hz}$

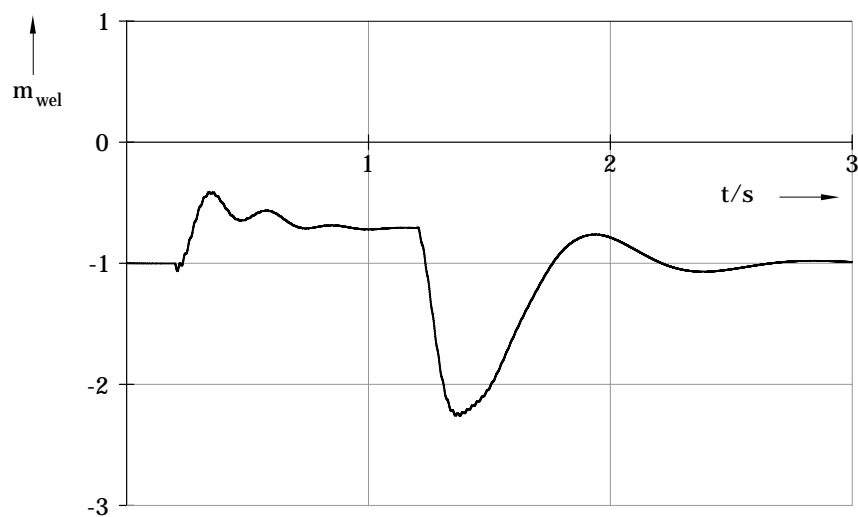


Bild 8d: Netzspannungs-Einbruch:

$$t_{\text{einbr}} = 1\text{s}, \quad u_1(0) = 1.0, \quad \Delta u_1 = 0.5$$

Zeitlicher Verlauf des Wellenmomentes

Antriebsmoment $m_A(0) = 1.0 = \text{konst.}$

Zweimassendrehchwinger $J_1 = J_{\text{ASM}}; \quad J_2 = 5 J_1, \quad f_0 = 3.5 \text{ Hz}$

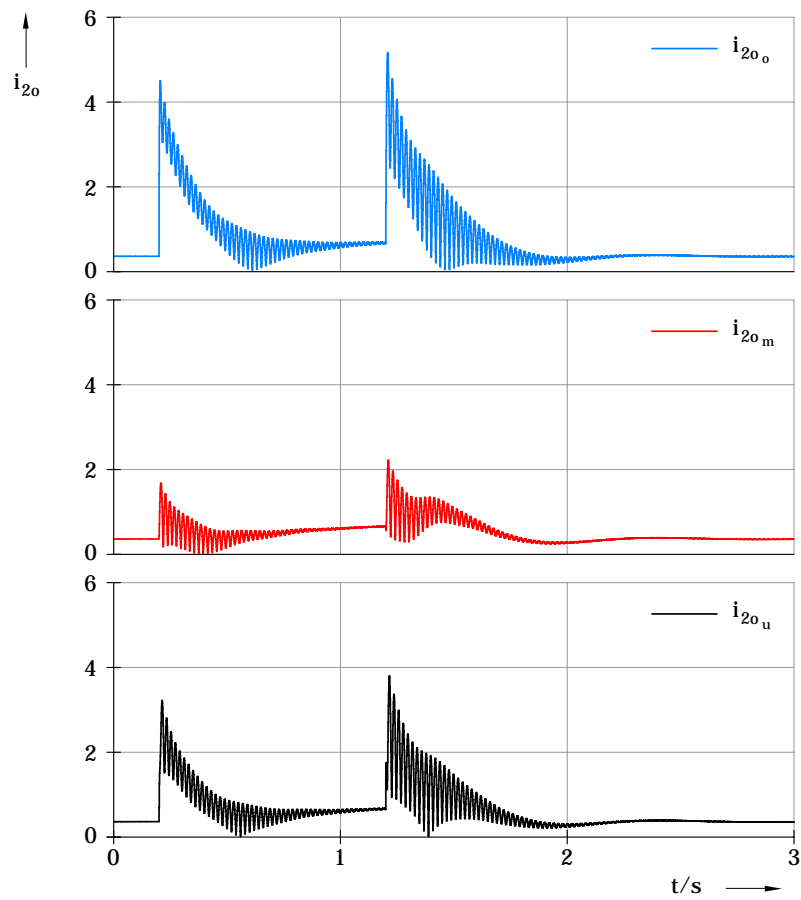


Bild 8e: Netzspannungs-Einbruch:

$$t_{\text{einbr}} = 1\text{s}, \quad u_1(0) = 1.0, \quad \Delta u_1 = 0.5$$

Zeitliche Verläufe des Betrages der Teilströme im Oberstab

Antriebsmoment $m_A(0) = 1.0 = \text{konst.}$

Zweimassendrehchwinger $J_1 = J_{\text{ASM}}; \quad J_2 = 5 J_1, \quad f_0 = 3.5 \text{ Hz}$

Indices: u, m, o: unterster, mittlerer und oberster Teilstab

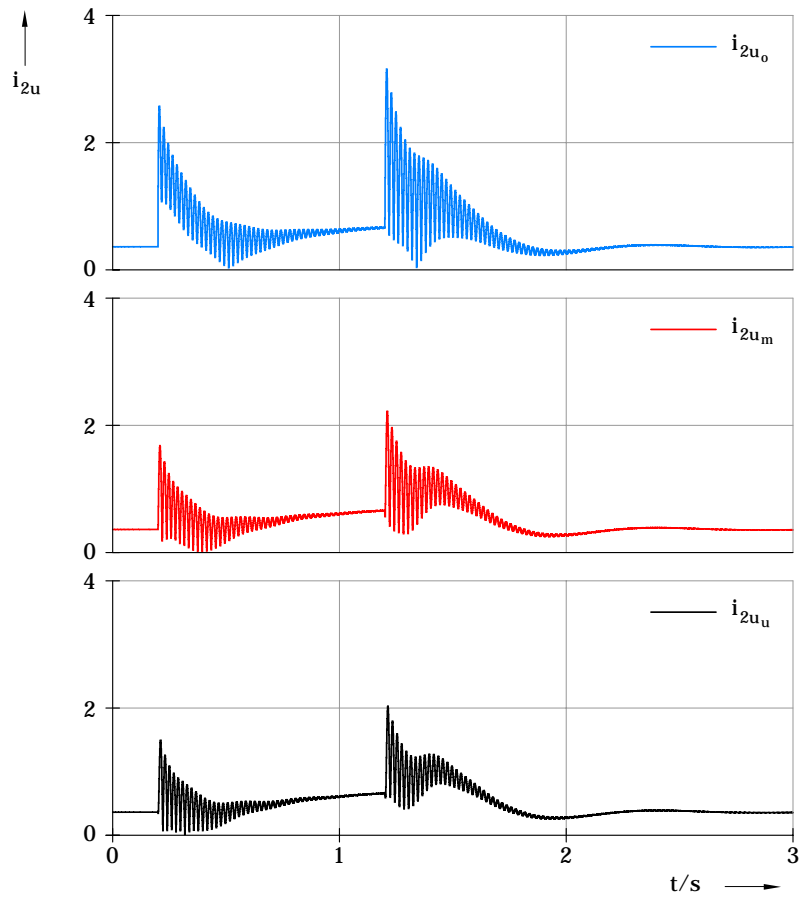


Bild 8f: Netzspannungs-Einbruch:

$$t_{\text{einbr}} = 1s, \quad u_1(0) = 1.0, \quad \Delta u_1 = 0.5$$

Zeitliche Verläufe des Betrages der Teilströme im Unterstab

Antriebsmoment $m_A(0) = 1.0 = \text{konst.}$

Zweimassendrehchwinger $J_1 = J_{\text{ASM}}; \quad J_2 = 5 J_1, \quad f_0 = 3.5 \text{ Hz}$

Indices: u, m, o: unterster, mittlerer und oberster Teilstab

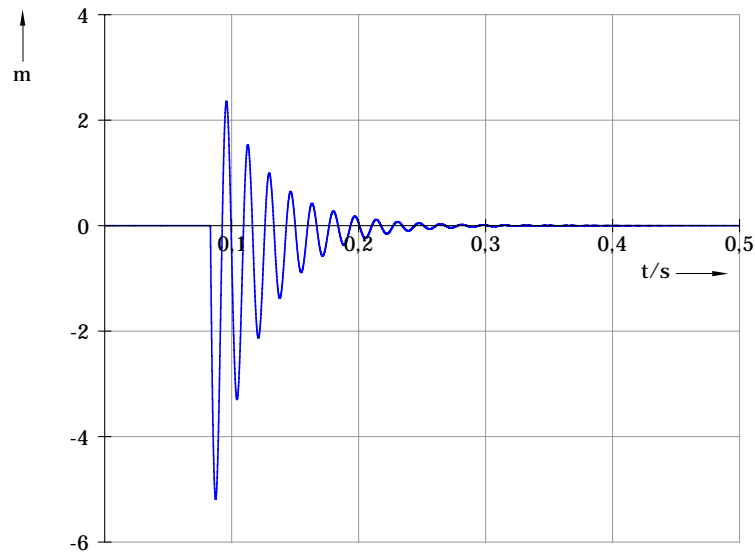


Bild 9a: Dreipoliger Kurzschluss aus dem Leerlauf:

$$u_1(0) = 0, \quad m_A(0) = 0; \quad J_{\text{ges}} = 6 J_{\text{ASM}}$$

Zeitlicher Verlauf des Luftspaltmomentes

ASM mit Schleifringläufer: 1545 kW; 60 Hz; 575 V; 1509 A

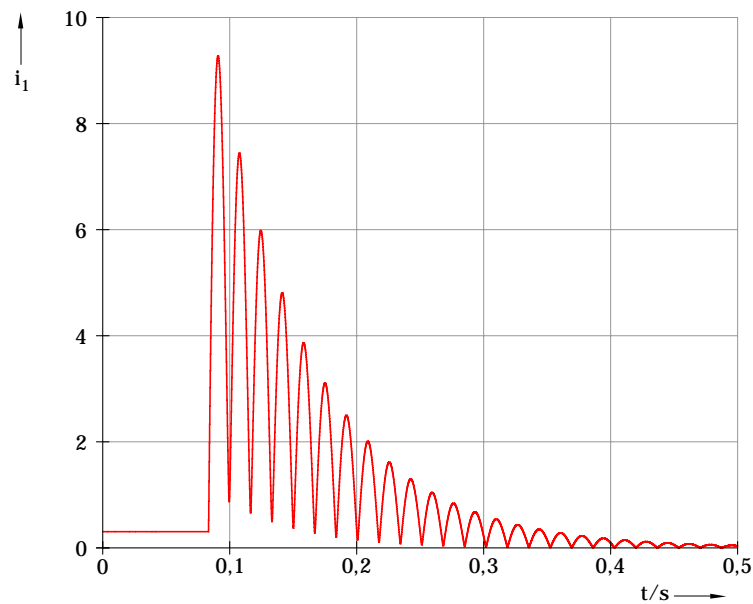


Bild 9b: Dreipoliger Kurzschluss aus dem Leerlauf:

$$u_1(0) = 0, \quad m_A(0) = 0; \quad J_{\text{ges}} = 6 J_{\text{ASM}}$$

Zeitlicher Verlauf des Ständerstrombetrages

ASM mit Schleifringläufer: 1545 kW; 60 Hz; 575 V; 1509 A

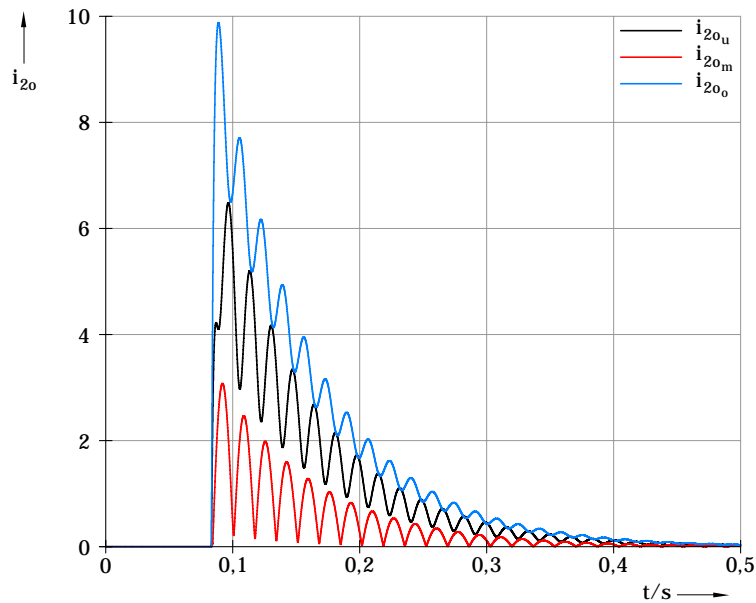


Bild 9c: Dreipoliger Kurzschluss aus dem Leerlauf:

$$u_1(0) = 0, \quad m_A(0) = 0; \quad J_{\text{ges}} = 6 J_{\text{ASM}}$$

Zeitliche Verläufe des Betrages der Teilströme im Oberstab

ASM mit Schleifringläufer: 1545 kW; 60 Hz; 575 V; 1509 A

Indices: u, m, o: unterster, mittlerer und oberster Teilstab

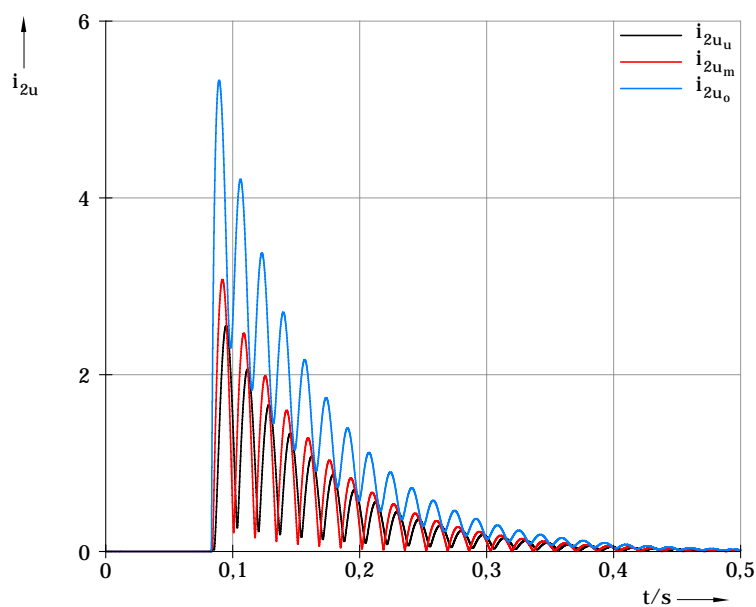


Bild 9d: Dreipoliger Kurzschluss aus dem Leerlauf:

$$u_1(0) = 0, \quad m_A(0) = 0; \quad J_{\text{ges}} = 6 J_{\text{ASM}}$$

Zeitliche Verläufe des Betrages der Teilströme im Unterstab

ASM mit Schleifringläufer: 1545 kW; 60 Hz; 575 V; 1509 A

Indices: u, m, o: unterster, mittlerer und oberster Teilstab

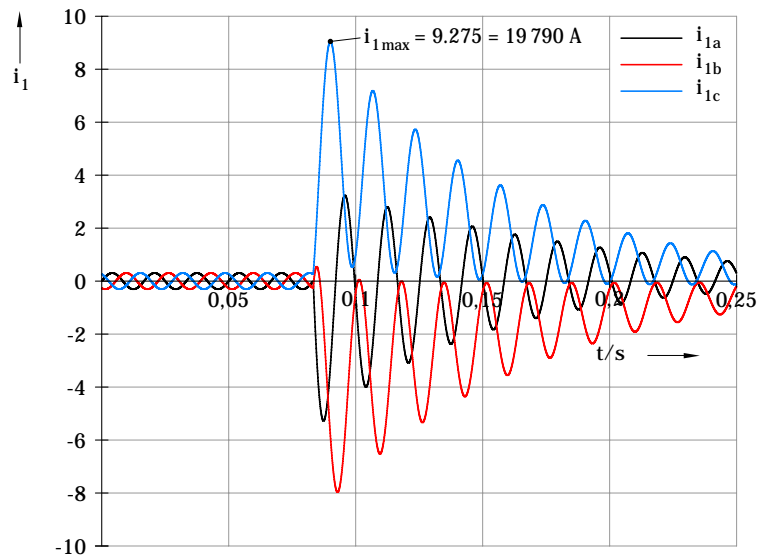


Bild 9e: Dreipoliger Kurzschluss aus dem Leerlauf:

$$u_1(0) = 0, \quad m_A(0) = 0; \quad J_{ges} = 6 J_{ASM}$$

Zeitliche Verläufe der Ständerstrangströme

ASM mit Schleifringläufer: 1545 kW; 60 Hz; 575 V; 1509 A

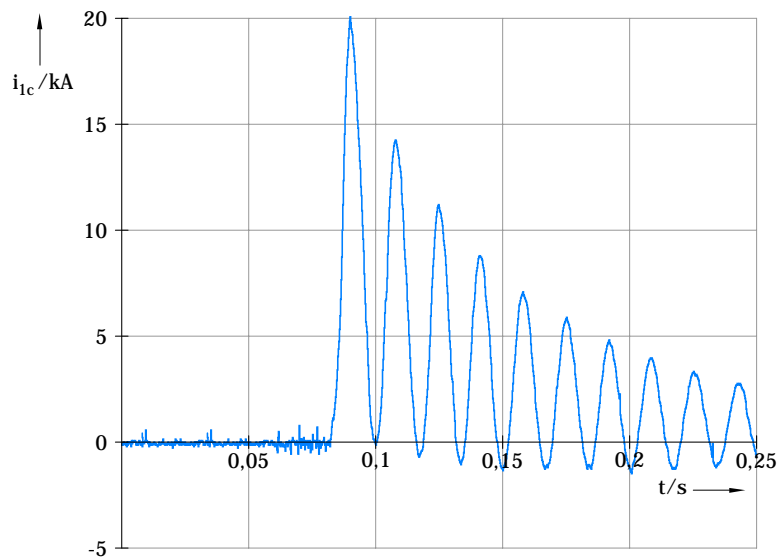


Bild 9f: Dreipoliger Kurzschluss aus dem Leerlauf:

$$u_1(0) = 0, \quad m_A(0) = 0; \quad J_{ges} = 6 J_{ASM}$$

Zeitlicher Verlauf des Ständerstrangstromes i_{1c} (Messung)

ASM mit Schleifringläufer: 1545 kW; 60 Hz; 575 V; 1509 A