

# Transiente Stromverdrängung im dynamischen Betrieb von DGAM großer Leistung

## Transient skin-effect during dynamic operation of high power DFIG

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Ulrich Beckert, TU Bergakademie Freiberg / Institut für Elektrotechnik, 09599 Freiberg, Lessingstraße 45, Sachsen - Deutschland, beckert@et.tu-freiberg.de

### Kurzfassung

Die doppelt-gespeiste Asynchronmaschine (DGAM) stellt eine wichtige Form des drehzahlvariablen Windenergie-Generators dar. Im Multi-MW-Bereich führt die Auslegung der Läuferwicklung auf eine Zweischichtstabwicklung, die zur Verminderung der Oberwellen heute meistens gesehen ausgeführt wird. Bei kurzschlussähnlichen Ausgleichsvorgängen tritt in den Läuferstäben starke Stromverdrängung auf, die das dynamische Verhalten wesentlich beeinflusst. Im Beitrag wird das dynamische Modell der DGAM mit einer gesehenen Zweischicht-Stubwicklung unter Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung vorgestellt.

### Abstract

The Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) represents one important form of the variable-speed generators. In the multi-MW range the design of the rotor winding leads to a two-layer bar winding, today mostly implemented as chorded winding in order to minimize current harmonics. During short-circuit-like transient situations strong skin-effect can be observed in the rotor bars, which significantly influences the dynamic characteristic. In this contribution the dynamic model of the DFIG with chorded two-layer winding and considering dynamic skin-effect will be presented.

## 1 Einleitung

Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine als sog. doppelt-gespeiste Asynchronmaschine (DGAM) stellt die Alternative zur umrichter gespeisten Synchronmaschine beim Einsatz als drehzahlvariabler Generator für Windkraftanlagen dar. Die Vorteile des Generatorkonzeptes mit der DGAM sind gut bekannt: Während beim Generatorkonzept mit der Synchronmaschine die gesamte Leistung über den Umrichter fließt, braucht bei der DGAM der im Läuferkreis liegende Frequenz-Umrichter nur die Läuferleistung zu liefern. Diese ist dem Schlupf proportional und beträgt deshalb nur einen Bruchteil der Ständerleistung, sofern man sich auf einen schmalen Drehzahlbereich um die Synchronzahl beschränkt. Während das stationäre Betriebsverhalten und die Regelung der DGAM heute weitgehend als gelöst und Stand der Technik sind, ist das dynamische Verhalten der DGAM, z.B. bei Netzstörungen, noch immer unvollständig gelöst.

Bei DGAM im Multi-MW-Bereich führt die Auslegung der Läuferwicklung auf eine Zweischicht-Stubwicklung. Die Leiterquerschnitte ähneln zunehmend den Hochstäben von Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren großer Leistungen mit Stabhöhen von 30 mm. Bei kurzschlussähnlichen Ausgleichsvorgängen tritt in den Läuferstäben starke transiente Stromverdrängung auf. Diese beeinflusst das dynamische Betriebsverhalten wesentlich.

Das zentrale Problem bei der Berechnung transienter Vorgänge besteht darin, dass nicht mehr von einem sinusförmigen Stromverlauf ausgegangen werden kann, sondern ein zeitlich beliebiger Verlauf zugrunde gelegt werden muss. Damit versagt auch das klassische Verfahren, die Stromverdrängung durch eine frequenzabhängige Vergrößerung der Stabwiderstände und eine frequenzabhängige Verminderung der Nutstreuinduktivität zu erfassen.

Hinzu kommt noch, dass zur Verbesserung der Form der induzierten Ständerspannung die Läuferwicklung von DGAM heute meistens gesehen ausgeführt wird. D.h., die Spulenweite wird gezielt kleiner als eine Polteilung gewählt, um bestimmte Oberwellen zu vermindern. Die Sehnung führt dazu, dass nicht mehr in jeder Läufernut Ober- und Unterstab zum gleichen Strang gehören.

Bei einer gesehenen Zweischicht-Stubwicklung tritt zusätzlich das Problem auf, dass in den Oberstäben eines Stranges unterschiedliche transiente Stromverdrängungen auftreten, abhängig davon, ob die Unterstäbe zum gleichen oder zu einem anderen Strang gehören. Dagegen wird die Stromverdrängung in den Unterstäben durch die Sehnung nicht beeinflusst.

Im Beitrag wird das dynamische Modell einer Schleifringläuferasynchronmaschine (AMSL) mit einer gesehten Zweischicht-Stabwicklung im Läufer entwickelt. Die transiente Stromverdrängung wird dadurch erfasst, dass man die sich über den Stabhöhen einstellenden transienten Stromdichteverteilungen durch Treppenkurven annähert.

## 2 Modell der AMSL mit Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung im Läufer

Unter den üblichen idealisierenden Annahmen sowie unter Annahme einer ungesehnten, in Stern geschalteten Zweischicht-Stabwicklung im Läufer wird dieses Modell durch folgendes Gleichungssystem im ständerbezogenen Koordinatensystem  $(\alpha, \beta)$  beschrieben [1]: Es gelten

die Ständerspannungsdifferentialgleichung:

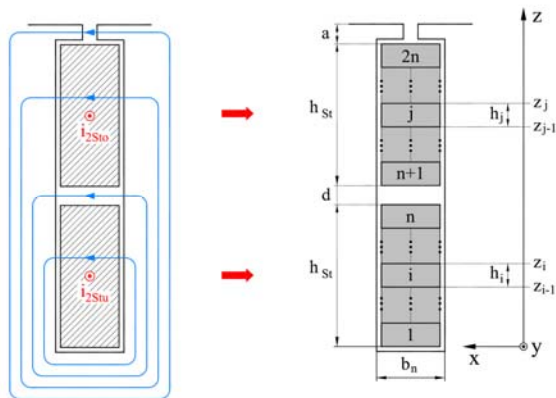
$$\frac{d\underline{\psi}_1}{dt} = \dot{\underline{\psi}}_1 = \underline{u}_1 - R_1 \dot{\underline{i}}_1 \quad (1)$$

die Ständerflussverkettung:

$$\underline{\psi}_1 = L_1 \dot{\underline{i}}_1 + L_h \dot{\underline{i}}_2 \quad (2)$$

Tritt in den Läuferstäben transiente Stromverdrängung auf, so werden die sich über den Stabhöhen von Unter- und Oberstab einstellenden transienten Stromdichteverteilungen durch Treppenkurven angenähert. Dies entspricht der fiktiven Unterteilung von Unter- und Oberstab in je  $n$  stromverdrängungsfreie Teilstäbe gemäß **Bild 1**.

Auf diese Weise entsteht das Modell einer Schleifringläuferasynchronmaschine mit  $2n$  Drehstromwicklungen im Läufer. Diese sind über das Hauptfeld und das Nutstrefeld magnetisch gekoppelt und über gemeinsame stromverdrängungsfreie Stirnverbindungen galvanisch verbunden. Die allgemein  $\mu$ -te Drehstromwicklung wird aus den  $i$ -ten Teilstäben der Oberstäbe und den  $j$ -ten Teilstäben der Unterstäbe gebildet.



**Bild 1** Nutquerfeld und fiktive Unterteilung von Unter- und Oberstab in je  $n$  stromverdrängungsfreie Teilstäbe

Es gelten

die Spannungsdifferentialgleichung der  $\mu$ -ten Drehstromwicklung im Läufer:

$$\frac{d\underline{\psi}_{2\mu}}{dt} = \underline{u}_2 - \left( R_{St,i} \dot{\underline{i}}_{2,i} + R_{St,j} \dot{\underline{i}}_{2,j} + R_{Stim} \dot{\underline{i}}_2 \right) + j n \underline{\psi}_{2\mu} \quad (3)$$

die Flussverkettung der  $\mu$ -ten Läuferwicklung:

$$\underline{\psi}_{2,\mu} = L_h \dot{\underline{i}}_1 + \left( L_h + L_{\sigma 2 \text{ red}} \right) \dot{\underline{i}}_2 + \underline{\psi}_{\sigma n 2, \mu} \quad (4)$$

die Nutstreflussverkettung der  $\mu$ -ten Läuferwicklung:

$$\begin{aligned} \underline{\psi}_{\sigma n 2, \mu} &= \underline{\psi}_{\sigma n St j} + \underline{\psi}_{\sigma n St i} \\ &= \sum_{k=1}^{2n} \left[ L_{\sigma n j, k} + L_{\sigma n i, k} \right] \dot{\underline{i}}_{2k} \end{aligned} \quad (5)$$

wobei  $j = 1 \dots n$   $i = (n+1) \dots (2n)$

Für die Teilstabströme gilt die Nebenbedingung:

$$\sum_{k=1}^n \dot{\underline{i}}_{2k} = \sum_{k=n+1}^{2n} \dot{\underline{i}}_{2k} = \dot{\underline{i}}_2 \quad (6)$$

In der Läuferstreuinduktivität

$$L_{\sigma 2 \text{ red}} = L_{\sigma 2} - L_{\sigma n 2}$$

ist der Nutstreuanteil, der wegen der Stromverdrängung gesondert behandelt wird, nicht mehr enthalten. Das Gleichungssystem wird vervollständigt durch die Beziehungen für

das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment

$$\underline{m}_i = \left( \underline{\psi}_1 \times \dot{\underline{i}}_1 \right) \quad (7)$$

und die Bewegungsdifferentialgleichung (Einmassendrehchwinger)

$$\frac{dn}{dt} = \dot{n} = \frac{1}{T_A} (m_i - m_w) \quad (8)$$

Für die verwendeten komplexen Raumvektoren gilt die Definition nach KOVACS [2].

$$\underline{g} = \frac{2}{3} \left( g_a(t) + \underline{a} g_b(t) + \underline{a}^2 g_c(t) \right) = g_\alpha + j g_\beta$$

wobei

$$\underline{a} = e^{j2\pi/3}, \quad \underline{a}^3 = 1 \quad \text{und} \quad \frac{1}{\underline{a}} = \underline{a}^2$$

Ohne besondere Kennzeichnung sind alle Läufergrößen unter Benutzung des reellen Übersetzungsverhältnisses

$$\ddot{u} = \frac{w_1 \xi_{1,1}}{w_2 \xi_{2,1}}$$

auf den Ständer umgerechnet. Außerdem sind alle vorkommenden Variablen und Parameter normiert, wobei die üblichen Bezugsgrößen [3] verwendet wurden.

### 3 Nutstreufeld bei transienter Stromverdrängung

Zur Nutstreufeldverteilung des allgemein  $i$ -ten Teilstabes tragen alle Teilstabströme bei. Für ihren Augenblickswert gilt:

$$\Psi_{\sigma n St i} = \sum_{k=1}^{2n} l_{\sigma n i, k} i_{2k} \quad (9)$$

Unter den Voraussetzungen, dass

- \* die magnetischen Spannungsabfälle im Eisen vernachlässigt werden können und
- \* eines reinen Nutquerfeldes

erhält man für die Selbst- und Gegeninduktivitäten des Nutstreufeldes [4]:

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

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

für  $k < i$

$$l_{\sigma n k, i} = l_{\sigma n i, k} \quad (10)$$

Die Vernachlässigung der Eisensättigung bei der Berechnung der Stromverdrängung ist gerechtfertigt. Die Gefahr einer Sättigung der Streuwege besteht nur im Bereich der Zahnköpfe bei kleinen Nutschlitzweiten. Diese sind je-

doch bei WE-Generatoren großer Leistung nicht üblich. Außerdem würde eine Sättigung der Zahnköpfe im Bereich der Nutschlitze die Stromverdrängung in den Stäben nicht beeinflussen.

Außerdem müssen zu jedem Zeitpunkt die Summen der Teilströme des Unterstabes und des Oberstabes den in den Stäben fließenden Strangströmen entsprechen.

$$\sum_{k=1}^n i_{2k} = i_{2Stu} \quad \sum_{k=n+1}^{2n} i_{2k} = i_{2Sto} \quad (11)$$

Im Fall der ungesehnten Zweischichtwicklung werden Unter- und Oberstab vom gleichen Strangstrom durchflossen. Schreibt man die Nutstreufeldverteilung des  $i$ -ten Teilstabes für alle drei Stränge an und fasst diese drei Gleichungen zu einem Raumvektor zusammen, so erhält man

$$\underline{\Psi}_{\sigma n St i} = \sum_{k=1}^{2n} l_{\sigma n i, k} i_{2k} \quad (12)$$

mit

$$\sum_{k=1}^n i_{2k} = \sum_{k=n+1}^{2n} i_{2k} = i_2 \quad (13)$$

### 4 Nutstreufeldverteilung einer ungesehnten Zweischicht-Stabwicklung

In einer **ungesehenen** Zweischicht-Stabwicklung gehören Unter- und Oberstab einer Läufernut stets zum gleichen Strang. Es gilt deshalb immer

$$i_{2Stu}(t) = i_{2Sto}(t) = i_{2Strang}(t)$$

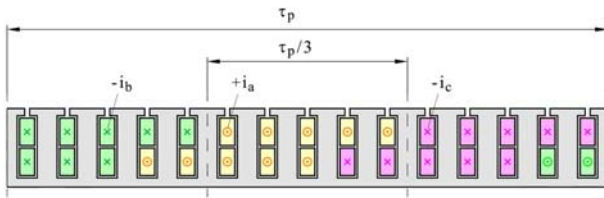
In einer **gesehenen** Zweischicht-Stabwicklung existieren, abhängig von der Sehnung  $W/\tau_p$ , je Strang

- $N_u$  Nuten, in denen nur der Unterstab,
- $N_o$  Nuten, in denen nur der Oberstab und
- $N_v$  Nuten, in denen der Unter- und der Oberstab (Index  $v$  = vollständig), zum betrachteten Strang gehören, s. **Bild 2**. Es gilt

$$N_o = N_u = \frac{N_2}{3} \left[ 3 \left( 1 - \frac{W}{\tau_p} \right) \right]$$

$$N_v = \frac{N_2}{3} \left[ 1 - 3 \left( 1 - \frac{W}{\tau_p} \right) \right]$$

(14)



**Bild 2** Stromverteilung in einer gesehten Zweischicht-Stabwicklung im Bereich einer Polteilung

Die eingangs getroffene Annahme der Vernachlässigung der Eisensättigung ist für die Berechnung der transienten Stromverdrängung von zentraler Bedeutung. Das Problem wird dadurch zu einem linearen Problem. Es gilt das Prinzip der Superposition. Dadurch ist es möglich, die  $n$  Teilstabströme des Oberstabes in je eine gegeninduktive und in eine selbstinduktive Komponente zu zerlegen [5]:

$$i_{2i} = i'_{2i} + i''_{2i} \quad \text{wobei} \quad i = (n+1) \dots (2n) \quad (15)$$

Die gegeninduktiven Stromkomponenten  $i'_{2i}$  entstehen dadurch, dass sich die Teilstäbe des Oberstabes im (homogenen) Nutstreufeld des Strangstromes im Unterstab befinden. Fließt im Unterstab der Strangstrom  $i_{2a}$ , so induziert seine zeitliche Änderung im Oberstab die Teilstabströme  $i'_{2i,a}$ . Allgemein gilt

$$i_{2\text{Stu}} = i_{2a} \rightarrow i'_{2i,a}$$

$$i_{2\text{Stu}} = i_{2b} \rightarrow i'_{2i,b}$$

$$i_{2\text{Stu}} = i_{2c} \rightarrow i'_{2i,c}, \quad \text{wobei} \quad i = (n+1) \dots (2n)$$

Die gegeninduktiven Teilstabströme im Oberstab verlaufen symmetrisch zur Stabmitte ( $h_S/2$ ):

$$i'_{2,2n} = -i'_{2,n+1}, \quad i'_{2,2n-1} = -i'_{2,n+2} \quad \text{usw.}$$

Ihre Summe ist stets Null.

Die selbstinduktiven Stromkomponenten  $i''_{2i}$  im Oberstab haben die gleiche einseitige Stromverdrängung wie die Teilstabströme im Unterstab, wenn in ihm der gleiche Strangstrom fließt. Es gilt also:

$$i''_{2i,a} = i_{2(i-n),a} \quad i''_{2i,b} = i_{2(i-n),b} \quad i''_{2i,c} = i_{2(i-n),c}$$

für  $i = (n+1) \dots (2n)$  (16)

Im Falle einer Sehnung der Läuferwicklung gilt für die Nutstreifflussverkettung der  $i$ -ten Teilstäbe der Oberstäbe des Stranges a:

$$\Psi_{\sigma\text{St}i,a} = N_v \left[ \sum_{k=1}^n 1_{\sigma i,k} i_{2k,a} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} (i'_{2k,a} + i''_{2k,a}) \right]$$

$$+ N_o \left[ - \sum_{k=1}^n 1_{\sigma i,k} i_{2k,c} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} (-i'_{2k,c} + i''_{2k,a}) \right]$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (16) erhält man über

$$\sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} i''_{2k,a} = \sum_{k=1}^n 1_{\sigma i,n+k} i_{2k,a}$$

für die Nutstreifflussverkettung aller  $i$ -ten Teilstäbe der Oberstäbe des Stranges a:

$$\Psi_{\sigma\text{St}i,a} =$$

$$N_v \left[ \sum_{k=1}^n (1_{\sigma i,k} + 1_{\sigma i,n+k}) i_{2k,a} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} i'_{2k,a} \right]$$

$$+ N_o \left[ - \sum_{k=1}^n 1_{\sigma i,k} i_{2k,c} + \sum_{k=1}^n 1_{\sigma i,n+k} i_{2k,a} - \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} i'_{2k,c} \right] \quad (17)$$

wobei  $i = (n+1) \dots (2n)$

Schreibt man die analogen Beziehungen für die Stränge b und c an und fasst die Nutstreifflussverkettungen aller  $i$ -ten Teilstäbe der drei Stränge zu einem Raumvektor zusammen, so erhält man nach längerer Rechnung

$$\underline{\Psi}_{\sigma\text{St}i} = w_2 \left[ \sum_{k=1}^n (1_{\sigma i,k} + 1_{\sigma i,n+k}) \underline{i}_{2k} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} \underline{i}'_{2k} \right]$$

$$+ N_o \underline{a}^2 \left[ \sum_{k=1}^n 1_{\sigma i,k} \underline{i}_{2k} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma i,k} \underline{i}'_{2k} \right] \quad (18)$$

Auf ähnlichem Wege erhält man über

$$\Psi_{\sigma\text{St}j,a} = N_v \left[ \sum_{k=1}^n 1_{\sigma j,k} i_{2k,a} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma j,k} (i'_{2k,a} + i''_{2k,a}) \right]$$

$$+ N_u \left[ \sum_{k=1}^n 1_{\sigma j,k} i_{2k,a} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma j,k} (i'_{2k,a} - i''_{2k,b}) \right]$$

für den Raumvektor der Nutstreifflussverkettungen der  $j$ -ten Teilstäbe aller Unterstäbe

$$\underline{\Psi}_{\sigma n St j} = w_2 \left[ \sum_{k=1}^n (1_{\sigma n j, k} + 1_{\sigma n j, n+k}) \dot{i}_{2k} + \sum_{k=n+1}^{2n} 1_{\sigma n j, k} \dot{i}'_{2k} \right] + N_u \underline{a} \sum_{k=1}^n 1_{\sigma n j, n+k} \dot{i}_{2k},$$

wobei  $j = 1 \dots n$  (19)

## 5 Nutstreifflussverkettung der $\mu$ -ten Drehstromwicklung

Im gewählten Modell wird die allgemein  $\mu$ -te Drehstromwicklung des Läufers aus den  $i$ -ten Teilstäben der Oberstäbe und den  $j$ -ten Teilstäben der Unterstäbe gebildet. Für die Nutstreifflussverkettung der  $\mu$ -ten Drehstromwicklung gilt in Raumvektorschreibweise

$$\begin{aligned} \underline{\Psi}_{\sigma n 2, \mu} &= \underline{\Psi}_{\sigma n St, i} + \underline{\Psi}_{\sigma n St, j} \\ \underline{\Psi}_{\sigma n 2, \mu} &= w_2 \left[ \sum_{k=1}^n (1_{\sigma n i, k} + 1_{\sigma n j, k}) \dot{i}_{2k} + \sum_{k=1}^n (1_{\sigma n i, n+k} + 1_{\sigma n j, n+k}) \dot{i}_{2k} + \sum_{k=n+1}^{2n} (1_{\sigma n i, k} + 1_{\sigma n j, k}) \dot{i}'_{2k} \right] \\ &+ N_g \left[ \sum_{k=1}^n (\underline{a}^2 1_{\sigma n i, k} + \underline{a} 1_{\sigma n j, n+k}) \dot{i}_{2k} + \sum_{k=n+1}^{2n} \underline{a}^2 1_{\sigma n i, k} \dot{i}'_{2k} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Nach Einführung eines Sehnungsfaktors

$$\alpha_s = \frac{N_g}{N_g + N_v} = \frac{N_g}{N_2 / 3} \quad (21)$$

sowie Umrechnung auf den Ständer und Normierung erhält man schließlich für den Raumvektor der Nutstreifflussverkettung der  $\mu$ -ten Läuferwicklung:

$$\begin{aligned} \underline{\Psi}_{\sigma n 2, \mu} &= \sum_{k=1}^n \left[ (1 + \alpha_s \underline{a}^2) L_{\sigma n i, k} + L_{\sigma n j, k} \right] \dot{i}_{2k} \\ &+ \sum_{k=1}^n \left[ L_{\sigma n i, n+k} + (1 + \alpha_s \underline{a}) L_{\sigma n j, n+k} \right] \dot{i}_{2k} \\ &+ \sum_{k=n+1}^{2n} \left[ (1 + \alpha_s \underline{a}^2) L_{\sigma n i, k} + L_{\sigma n j, k} \right] \dot{i}'_{2k} \end{aligned} \quad (22)$$

Gl. (22) lässt erkennen, dass

- der Ausdruck für die Nutstreifflussverkettung der ungesehnten Zweischicht-Stabwicklung als Sonderfall für  $\alpha_s = 0$  enthalten ist und
- durch die Sehnung die Elemente der Nutstreif-Induktivitätsmatrix wegen der Terme  $(1 + \alpha_s \underline{a})$  und  $(1 + \alpha_s \underline{a}^2)$ ,

wobei  $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$

komplex werden, so dass die  $\alpha$ -Komponenten der Nutstreifflussverkettungen jetzt auch von den  $\beta$ -Komponenten der Teilstabströme abhängen, usw.

## 6 Spannungsdifferentialgleichung der $\mu$ -ten Drehstromwicklung

Bei Anschrift der Läufer Spannungsdifferentialgleichungen muss beachtet werden, dass die Sehnung auch die Spannungsabfälle über den Teilstabwiderständen beeinflusst. Unter Berücksichtigung, dass sich die Teilstabströme der Oberseite als Überlagerung einer gegeninduktiven und einer selbstinduktiven Komponente darstellen lassen, erhält man für den Ohmschen Spannungsabfall des Stranges  $a$  der  $\mu$ -ten Drehstromwicklung zunächst

$$\begin{aligned} u_{R \mu, a} &= R_{\text{Stirn}} \dot{i}_{2a} + N_v r_{\text{Sti}} (\dot{i}'_{2i, a} + \dot{i}''_{2i, a}) \\ &+ N_o r_{\text{Sti}} (-\dot{i}'_{2i, c} + \dot{i}''_{2i, a}) + (N_v + N_u) r_{\text{Stj}} \dot{i}_{2j, a} \end{aligned}$$

und schließlich für den Raumvektor der Ohmschen Spannungsabfälle

$$\begin{aligned} \underline{u}_{R \mu} &= R_{\text{Stim}} \dot{i}_2 + (1 + \alpha_s \underline{a}^2) R_{\text{Sti}} \dot{i}'_{2i} \\ &+ R_{\text{Sti}} \dot{i}_{2(i-n)} + R_{\text{Stj}} \dot{i}_{2j} \end{aligned} \quad (23)$$

Damit lauten die Spannungsdifferentialgleichungen der  $\mu$ -ten Drehstromwicklung im Falle der Sehnung

$$\frac{d\underline{\psi}_{2\mu}}{dt} = \underline{u}_2 - \left( R_{\text{Stirn}} \underline{i}_2 + (1 + \alpha_s \underline{a}^2) R_{\text{Sti}} \underline{i}'_{2i} + R_{\text{Sti}} \underline{i}_{2(i-n)} + R_{\text{Stj}} \underline{i}'_{2j} \right) + jn \underline{\psi}_{2\mu} \quad (24)$$

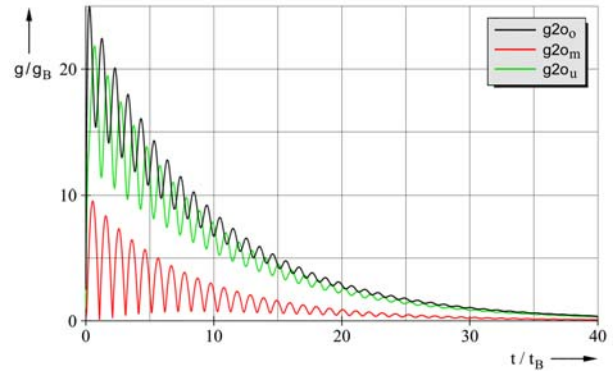
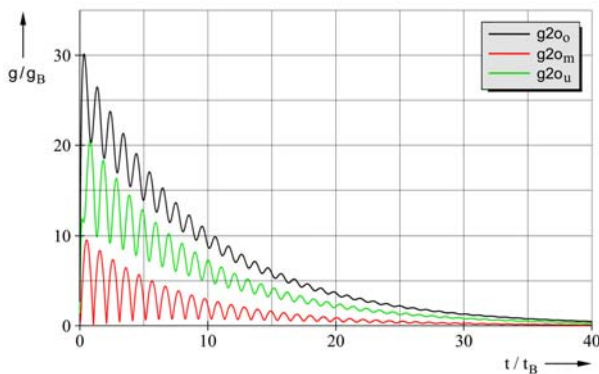
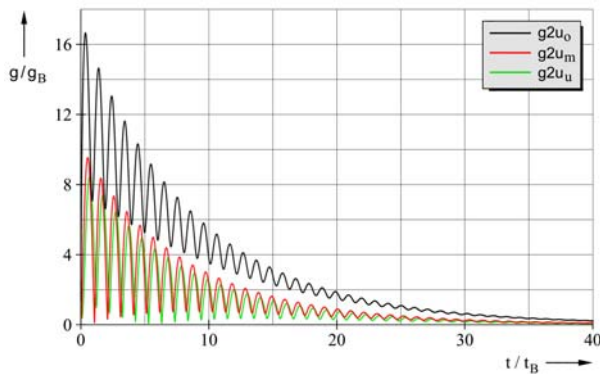
Für die Teilstabströme gilt:

$$\sum_{k=1}^n \underline{i}'_{2k} = \underline{i}_2 \quad \sum_{k=n+1}^{2n} \underline{i}'_{2k} = 0 \quad (25)$$

Die Gln. (1), (24), (2), (22), (7), (8) und (25) beschreiben in ihrer Gesamtheit das dynamische Verhalten der Schleifringläuferasynchronmaschine mit einer gesehten Zweischichtstabwicklung im Läufer unter Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung. Eine ausführliche Darstellung der Theorie wird in [5] gegeben.

Die dargestellte Theorie wurde in ein Simulationsprogramm umgesetzt, mit dem das Verhalten einschließlich des mechanischen Antriebsstranges, des Netzes usw. bei allen wichtigen dynamischen Betriebs- und Störungsfällen simuliert werden kann.

**Bild 3** zeigt exemplarisch die transiente Stromverdrängung in einer gesehten Zweischicht-Stubwicklung beim dreipoligen Kurzschluss eines 5,4 MW-Windenergiegenerators.



**Bild 3** Dreipoliger Kurzschluss: Zeitliche Verläufe der Stromdichten im untersten, mittleren und obersten Teilstab ( $n = 7$ )

- des Unterstabes
- des Oberstabes, Unterstab gehört zum gleichen Strang
- des Oberstabes, Unter- und Oberstab gehören zu verschiedenen Strängen

$$(g = \hat{I}_{2n} / A_{\text{Stab}} = \text{normierte Stromdichte})$$

Ein Vergleich der Bilder 3b und 3c lässt erkennen, dass es für die Stromdichteverteilungen im Oberstab wesentlich ist, ob der Unterstab zum gleichen oder zu einem anderen Strang gehört.

## 7 Literatur

- Beckert, U.; Stupin, P.: Dynamisches Verhalten der doppelt-gespeisten Asynchronmaschine mit Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer. *antriebstechnik* 42 (2003), H. 8, S. 46-51
- Kovacs, K.P.; Racz, I.: *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*. Bd. 1 und Bd. 2 Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 1959
- Pfaff, G.: *Regelung elektrischer Antriebe*. Bd. 1.; R. Oldenbourg Verlag, München-Wien 1994
- Beckert, U.: *Theorie des dynamischen Verhaltens der doppelt gespeisten Asynchronmaschine mit Berücksichtigung der Stromverdrängung im Läufer*. Forschungsbericht des IfE 2003
- Beckert, U.: *Theorie des dynamischen Verhaltens der Schleifringläufer-Asynchronmaschine als doppelt gespeiste Asynchronmaschine unter Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung in einer gesehten Zweischicht-Stubwicklung im Läufer*. Forschungsbericht des IfE 2005