

3dimensionale numerische Feldberechnung und Simulation eines Klauenpolgenerators

G. Henneberger, S. Küppers und R. Block, Aachen

Übersicht: Klauenpolgeneratoren werden als Bordgeneratoren in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Der Generator wird mit finiten Elementen dargestellt, und das 3dimensionale statische magnetische Feld unter Berücksichtigung der Eisensättigung berechnet. Zur Ermittlung der Betriebspunkte wird das Zeigerdiagramm der Grundschwingungen von Strom und Spannung aus neu abgeleiteten Induktivitätsfunktionen entwickelt. Aus diesen Induktivitäten lassen sich die Spannungsgleichungen berechnen, mit deren Hilfe sich eine Simulation der Zeitverläufe von Strom und Spannung bei beliebiger Belastung durchführen läßt.

3dimensional numerical field calculation and simulation of a claw-pole alternator

Contents: Claw-pole alternators are used as generators in vehicles. The alternator is modelled by finite elements, and the 3dimensional static magnetic field is calculated taking the saturation into account. To determine the points of operation, the phasor diagram of the fundamentals of current and voltage is developed out of new inductivity functions. From these inductivities the voltage equations of the machine can be derived and a simulation of the waveforms of current and voltage can be carried out for any given load.

Liste der verwendeten Symbole

μ_0	Permeabilität des Vakuums
μ_r	relative Permeabilitätskonstante
w	Statorwindungszahl
l_E	Eisenlänge
z	Koordinate in Richtung der Maschinenachse
p	Polpaarzahl
n	Drehzahl
f	Frequenz
ω	Kreisfrequenz
k	Ordnung der Oberschwingung
K_2, K_4	Koeffizienten der Leitwertfunktion $1/\delta$
k_p	Stromübersetzungsfaktor
R_1	Statorwiderstand
$\cos \varphi$	Grundschwingungsverschiebungsfaktor
α	mechanischer Winkel
β	elektrischer Winkel
δ_0	Hauptluftspalt zwischen Stator und Rotor
δ_m	mittlerer Luftspalt

ξ_2, ξ_4	Winkel der Leitwertfunktion $1/\delta$
ψ	Winkel zwischen Statorstrom I_1 und der Querachse
ζ	Winkel zwischen Polradfluß und Längsachse
ϱ_k	Winkel zwischen k -ter Statorflußoberschwingung und Längsachse
φ_k	Winkel zwischen k -ter Strangstromoberschwingung und Strangspannungsgrundschwingung
γ_k	Winkel der k -ten Oberschwingung der Strangspannung
i_u	Strom des Statorstrangs U
I_f	Erregerstrom
I_f'	auf Statorwindungszahl bezogener Erregerstrom
I_μ	Magnetisierungsstrom
I_d	Längsstrom
I_q	Querstrom
I_b	Batteriestrom
u_{su}	Spannung des Statorstranges U ohne ohmschen Spannungsabfall an R_1
$u_{kl,u}$	Spannung des Statorstranges U an den Klemmen
U_b	Batteriespannung
U_p	Polradspannung
P_{batt}	Batterieleistung
P_{Diode}	Diodenverlustleistung
P_1	abgegebene Generatorleistung
U_{Schl}	Schleusenspannung der Dioden
R_D	Bahnwiderstand der Dioden
Ψ_p	Flußverkettung des Polrades
$\Psi_{s,k}$	k -te Oberschwingung der Statorflußverkettung
Φ_p	Fluß des Polrades
B	Induktion, magnetische Flußdichte
B_L	Luftspaltinduktion
B_k	k -te Oberwelle der Luftspaltinduktion
$L_{1\sigma}$	Statorstreuinduktivität
L_d	Synchron-Längsinduktivität
L_q	Synchron-Querinduktivität
L_h	Hauptinduktivität
Θ_u	Durchflutung des Statorstrangs U
W_m	magnetische Energie

1 Einleitung

Seit mehr als 20 Jahren werden Klauenpolgeneratoren als Bordnetzgeneratoren in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Der ständig steigende Bedarf an elektrischer Leistung bei gleichzeitiger Absenkung der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors erhöht die Anforderungen an den Generator. Die zur Optimierung notwendige Vorausberechnung des Betriebsverhaltens läßt sich nicht mit hinreichender Genauigkeit nach den herkömmlichen

Methoden durchführen. Die Gründe sind in dem 3-dimensionalen Flußverlauf im Rotor, der hohen lokalen Sättigung sowie dem großen Streufluß im Rotor zu suchen. In dieser Arbeit werden daher 3dimensionale finite Elemente eingesetzt, um das Magnetfeld im gesamten Generator zu berechnen.

In Sternschaltung entsteht durch die Ankerrückwirkung eine starke dritte Oberschwingung in der Strangspannung. Dieser Effekt läßt sich erst nach der Berechnung neuer Induktivitätsfunktionen erklären. Aus diesen Induktivitäten wird dann das Zeigerdiagramm der Grundschwingungen entwickelt, das als Grundlage für die Auswertungen der Feldberechnung dient. Der Betriebspunkt wird zunächst für den einfachen Fall der Drehstromlast berechnet und danach auf eine Gleichrichterlast erweitert.

Die Spannungsgleichungen lassen sich aus den Flußverkettungen ableiten. Damit können unter Einsatz eines Netzwerksimulators (Pspice) die Zeitverläufe von Strom und Spannung für eine beliebige Last berechnet werden.

2 Berechnung der Induktivitäten

Bild 1 zeigt den Aufbau des Rotors eines 4poligen Klauenpolgenerators und den schematischen Umlaufweg des Flusses im Leerlauf. Die hier untersuchten Generatoren weisen eine Polpaarzahl $p = 6$ auf. Der Stator ist mit einer Drehstromwicklung versehen, wobei wegen der hohen Polzahl die Nutenzahl pro Pol und Strang $q = 1$ gewählt werden muß.

Um die Berechnung der Induktivitäten zu vereinfachen, wird ein mittlerer Luftspaltleitwert und eine mittlere Luftspaltinduktion eingeführt. Bild 2 zeigt oben die Abwicklung der Klauen. Hier ist ein übersichtliches Beispiel mit einer Polbedeckung $\alpha_i = 0,5$ und spitz zulaufenden Klauen gewählt. Vernachlässigt man den Spannungsabfall im Eisen und nimmt für das Feld in der Pollücke den Wert Null an, so ergibt sich im Leerlauf über den Polen eine konstante Induktion. Durch eine Mittelung über die z -Koordinate (Maschinenachse) erhält man für die mittlere Luftspaltinduktion den Verlauf, der im mittleren Graph von Bild 2 gezeigt ist. Der untere Graph zeigt den gemittelten Leitwert $1/\delta$, der nach (1) berechnet wurde. Nach (2) ergibt sich ein Gleichanteil im gemittelten Leitwert und Oberwellen gerader Ordnung.

$$\frac{1}{\delta}(\beta) = \frac{1}{l_E} \int_0^{l_E} \frac{1}{\delta}(\beta, z) dz \quad (1)$$

$$\frac{1}{\delta}(\beta) = \frac{1}{\delta_m} \left[1 + \sum_{k=2,4,6,\dots} K_k \cos(k\beta - \xi_k) \right] \quad (2)$$

Zur Geräuschminderung wird bei neuen Generatorausführungen an der ablaufenden Kante Material abgefräst. Diese sogenannte Polabhebung verursacht Phasenverschiebungen der Leitwertwellen, die durch die Winkel ξ_k beschrieben werden.

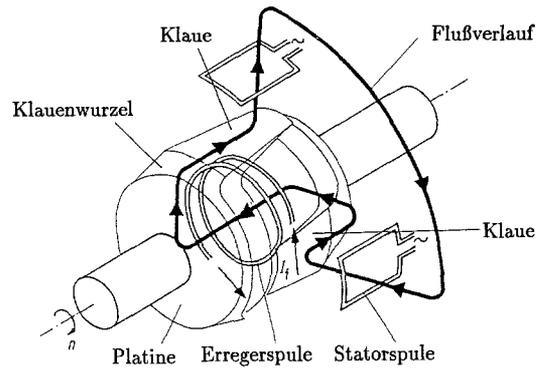


Bild 1. Schematischer Umlaufweg des Polradflusses für $p = 2$

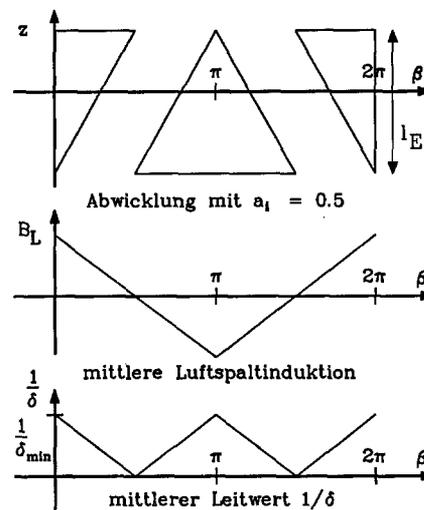


Bild 2. Abwicklung, Induktion und Leitwert

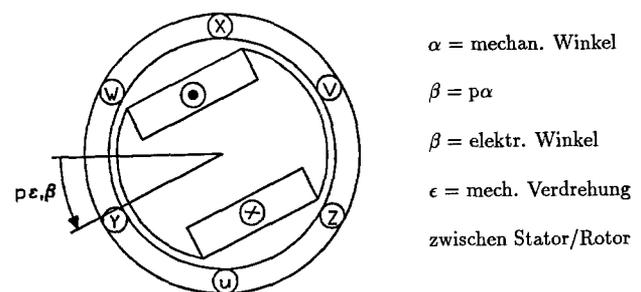


Bild 3. Schematisches Schnittbild

Mit dieser Darstellung des Luftspaltes läßt sich die Beschreibung des Klauenpolgenerators wie in Bild 3 durchführen. Das Schnittbild zeigt die Unsymmetrie des Rotors, die Lage der Nuten im Stator und definiert die Winkel. Da die Lochzahl $q = 1$ ist, sind pro Polpaar nur sechs Nuten einzuzeichnen. Es soll im folgenden die gesamte Wirkung der Ströme in den Nuten berücksichtigt werden. Daher wird die Durchflutung als Rechteckfunktion beschrieben, wie in Bild 4 dargestellt ist. Es sind also die Grundwelle und alle Oberwellen der Durch-

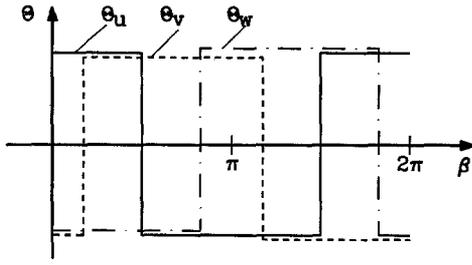


Bild 4. Durchflutung

flutung in der Berechnung enthalten:

$$\Theta_{ges}(\alpha, t) = \Theta_u(\alpha, t) + \Theta_v(\alpha, t) + \Theta_w(\alpha, t) \quad (3)$$

$$W_m = \int_V \frac{1}{2} BH \, dV = \int_0^{2\pi} \frac{B^2}{2\mu_0} \delta(\alpha) l r \, d\alpha$$

$$= \int_0^{2\pi} \Theta_{ges}^2 \frac{1}{\delta}(\alpha) \frac{\mu_0 l r}{8} \, d\alpha \quad (4)$$

$$W_m = \frac{1}{2} L_{uu} i_u^2 + \frac{1}{2} L_{vv} i_v^2 + \frac{1}{2} L_{ww} i_w^2 + L_{uv} i_u i_v$$

$$+ L_{uw} i_u i_w + L_{vw} i_v i_w. \quad (5)$$

Die im Luftspalt gespeicherte magnetische Energie kann über die Gleichungen (3) und (4) berechnet werden. Das Ergebnis liefert aus dem Vergleich mit (5) die gesuchten Induktivitäten (Gleichungen 7 bis 12). Der Luftspalt ist dabei bis zur vierten Ordnung genau beschrieben.

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{\delta_m} [1 + K_2 \cos(2p\alpha - 2p\epsilon - \xi_2)$$

$$+ K_4 \cos(4p\alpha - 4p\epsilon - \xi_4)] \quad (6)$$

$$L_{uu} = L_{vv} = L_{ww} = L_h = \frac{\mu_0 r l \pi}{2\delta_m} \left(\frac{w}{p}\right)^2 \quad (7)$$

$$L_{uv} = \frac{-L_h}{3} - L_2 \cos\left(2p\epsilon + \frac{\pi}{3} + \xi_2\right)$$

$$- L_4 \cos\left(4p\epsilon - \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) \quad (8)$$

$$L_{uw} = \frac{-L_h}{3} - L_2 \cos\left(2p\epsilon - \frac{\pi}{3} + \xi_2\right)$$

$$- L_4 \cos\left(4p\epsilon + \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) \quad (9)$$

$$L_{vw} = \frac{-L_h}{3} - L_2 \cos(2p\epsilon - \pi + \xi_2)$$

$$- L_4 \cos(4p\epsilon - \pi + \xi_4) \quad (10)$$

$$L_2 = L_h \frac{\sqrt{3} K_2}{\pi} \quad (11)$$

$$L_4 = L_h \frac{\sqrt{3} K_4}{2\pi} \quad (12)$$

Unter Einprägung eines sinusförmigen Drehstromsystems mit $i_u(t) = \sqrt{2} I_1 \cos\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$ ergibt sich die Statorflußverkettung des Stranges U zu:

$$\Psi_{su}(t) = \sqrt{2} I_1 \left(L_{1\sigma} \cos\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \right.$$

$$+ \frac{4}{3} L_h \cos\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$+ L_2 \cos\left(\omega t + \xi_2 + \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$- \frac{L_2}{2} \cos\left(3\omega t + \xi_2 - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$+ L_4 \cos\left(5\omega t + \xi_4 - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$- \frac{L_4}{2} \cos\left(3\omega t + \xi_4 + \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$\left. + \Psi_p \cos(\omega t + \zeta). \quad (13)$$

Daraus erhält man die induzierte Spannung im Erzeugerzählzeigersystem:

$$u_{su}(t) = \sqrt{2} I_1 \left(\omega L_{1\sigma} \sin\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \right.$$

$$+ \frac{4}{3} \omega L_h \sin\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$+ \omega L_2 \sin\left(\omega t + \xi_2 + \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$- \frac{3\omega L_2}{2} \sin\left(3\omega t + \xi_2 - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$+ 5\omega L_4 \sin\left(5\omega t + \xi_4 - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$- \frac{3\omega L_4}{2} \cos\left(3\omega t + \xi_4 + \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

$$\left. + \omega \Psi_p \sin(\omega t + \zeta). \quad (14)$$

Der Term $3\omega L_2/2$ ruft die dritte Oberschwingung der Strangspannung hervor, die bei hoher Drehzahl größer als die Grundschwingung wird. Dieser Term tritt erst auf, wenn alle Wicklungsoberrwellen in der Ableitung der Induktivitäten berücksichtigt werden. Er kommt durch die Unsymmetrie des Rotors in Verbindung mit der Lochzahl $q = 1$ zustande.

Aus diesen Gleichungen kann das Zeigerdiagramm der Grundschwingung abgeleitet werden (Bild 5). Dazu

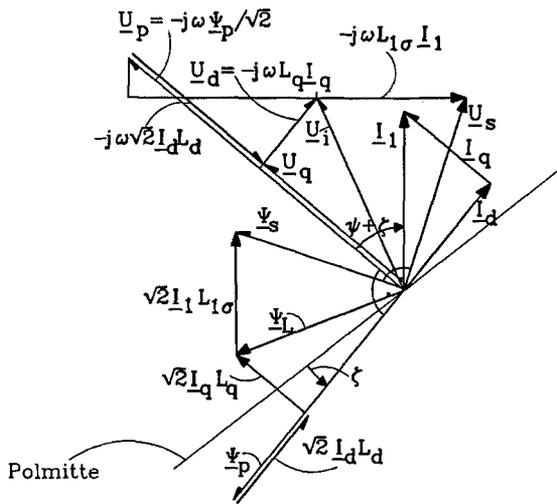


Bild 5. Zeigerdiagramm der Grundschwingung

wird die Längsinduktivität L_d und die Querinduktivität L_q eingeführt.

$$L_d = \frac{4}{3} L_h + L_2 \quad L_q = \frac{4}{3} L_h - L_2 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{su}(t) = & \sqrt{2} I_1 L_{1\sigma} \cos \left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \\ & + \Psi_p \cos (\omega t + \zeta) \\ & - L_d \sqrt{2} I_1 \sin (\psi + \zeta) \cos (\omega t + \zeta) \\ & + L_q \sqrt{2} I_1 \cos (\psi + \zeta) \sin (\omega t + \zeta) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u_{su}(t) = & \omega L_{1\sigma} \sqrt{2} I_1 \sin \left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \\ & + \omega \Psi_p \sin (\omega t + \zeta) \\ & - \omega L_d \sqrt{2} I_1 \sin (\psi + \zeta) \sin (\omega t + \zeta) \\ & - \omega L_q \sqrt{2} I_1 \cos (\psi + \zeta) \cos (\omega t + \zeta). \end{aligned} \quad (17)$$

Auf diesem Zeigerdiagramm basiert die Auswertung der Feldberechnung.

3 Modellierung mit finiten Elementen

Die numerische Berechnung mit finiten Elementen stellt das zentrale Hilfsmittel dieser Rechenmethode dar. Es wird ein kommerzielles Feldberechnungsprogramm (MagNet 3D) eingesetzt, das es erlaubt, das statische magnetische Feld zu berechnen, wobei zwar die nicht-lineare Eisenkennlinie berücksichtigt wird, nicht aber die magnetische Anisotropie im geblechtem Stator, die durch die Blechisolation hervorgerufen wird. Die Anisotropie kann durch mehrere schmale Luftspalte im Stator modelliert werden. Bild 6 zeigt eine Ansicht eines Modells. Es ist zu erkennen, daß in Richtung der Maschinenachse die Anordnung nur stufig dargestellt wird. In der dazu senkrechten Fläche läßt sich jede Geometrie mit Drei-

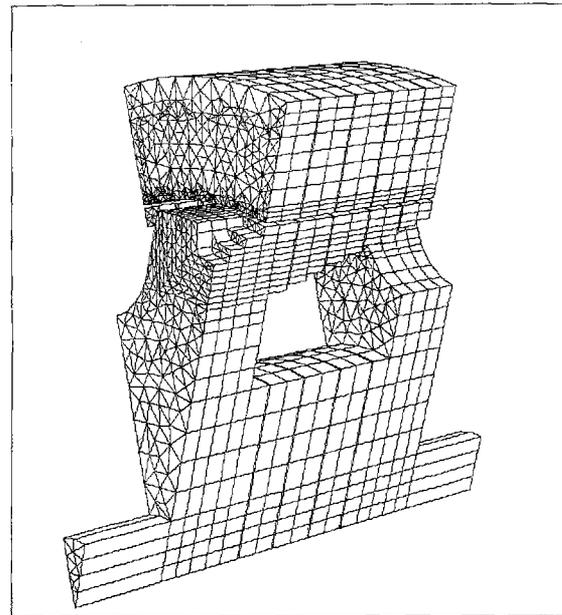


Bild 6. Finite Elemente Modell des Generators

ecken vernetzen. Die stufige Modellierung in Achsenrichtung ist auf den hier verwendeten Netzwerkgenerator zurückzuführen. Indem die Abstände der Stufen klein genug gehalten werden, läßt sich eine hinreichend genaue Approximation der tatsächlichen Geometrie erreichen.

Der Einfluß der am Rotor beidseitig angebrachten Lüfter und der Lagerschalen wird untersucht. Da sich keine wesentliche Beeinflussung der Leerlauf- oder Lastkennlinie ergibt, wird auf eine Darstellung dieser Teile verzichtet. Hingegen werden sekundäre Luftspalte, die produktionstechnisch zwischen den Komponenten des Rotors bestehen bleiben, in der Modellierung berücksichtigt.

Die Größe der Modelle schwankt je nach Genauigkeit der Darstellung zwischen 20000 und 30000 Knoten, die Zahl der Tetraeder liegt zwischen 100000 und 150000.

Zur Auswertung der Rechnungen wird zum einen das Luftspaltfeld untersucht, zum anderen die Flußverkettung der drei Stränge bestimmt. Durch die oben erklärte Art der Modellierung der Geometrie werden die schrägen Klauen stufig abgebildet. Schneidet man das Modell senkrecht zur Maschinenachse genau in der Mitte einer solchen Stufe, so kann man die Normalkomponente der Induktion berechnen. Durch eine anteilige Addition der Induktionswellen aller Stufen nach (18) erhält man die mittlere Induktion im Luftspalt, aus der sich der Luftspaltfluß nach Betrag und Phase berechnen läßt.

$$B_k = \sum_i \frac{l_i}{l_{ges}} B_{k,i} \cos (k\beta - \varphi_k) \quad (18)$$

Die Flußverkettung eines Stranges soll unter Berücksichtigung der Stirn- und Nutstreuung ermittelt werden. Dazu werden genau an den Stellen Schnitte durch das Modell gelegt, an denen sich 6 fiktive Leiter befinden. Diese Leiter sind gleichmäßig auf eine Nut verteilt. Durch

Integration über der Fläche einer Leiterschleife wird der Fluß berechnet, der mit einem Leiter verkettet ist. Somit ergibt die Mittelung über die 6 Leiter die mittlere Flußverkettung eines Leiters auch unter Einberechnung der Streuung. Man erhält so einen Wert der Flußverkettung pro Strang, woraus sich wegen der Symmetrie und Periodizität insgesamt 6 diskrete Werte der Flußverkettung eines Stranges ergeben.

4 Leerlauf

Im Leerlauf des Generators wird nur ein Erregerstrom eingepreßt, es fließen keine Ankerströme. Bild 7 zeigt die Statorflußverkettung als Funktion des elektrischen Winkels. Jedes Finite-Elemente-Modell stellt eine bestimmte Stellung zwischen Rotor und Stator dar. Pro Modell ergeben sich 6 Werte der Statorflußverkettung im Abstand von 60°. Werden mehr Werte benötigt, so muß man weitere Finite-Elemente-Modelle erzeugen, die andere Rotor-Stator-Stellungen abbilden. Bild 7 liegen Rechnungen mit 10 Modellen zugrunde. Die diskrete Fourier-Transformation erlaubt die Berechnung der Grund- und Oberschwingungen aus diesen diskreten Werten (siehe Tabelle 1). Aus der Statorflußverkettung wird mit (19) für eine Drehzahl von $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ die induzierte Spannung berechnet.

$$U_{s,k} = kw\omega \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_{s,k} \tag{19}$$

Damit kann die gemessene und berechnete Leerlaufspannung bei den zwei angegebenen Erregungen verglichen werden. Insgesamt erhält man eine gute Übereinstimmung. Bei kleiner Erregung liegt der berechnete Wert immer einige Prozent über der Messung, während bei

Tabelle 1. Flüsse und Spannungen im Leerlauf

k	$I_f = 1,0 \text{ A}$			$I_f = 4,0 \text{ A}$		
	$\Phi_{s,k}/\mu\text{Vs}$	$U_{s,k}/\text{V}$	$U_{k,mess}/\text{V}$	$\Phi_{s,k}/\mu\text{Vs}$	$U_{s,k}/\text{V}$	$U_{k,mess}/\text{V}$
1	180,6	3,37	3,16	330,6	6,17	6,33
3	2,1	0,12	0,15	8,9	0,50	0,12
5	0,4	0,03	0,03	1,7	0,16	0,14
7	0,8	0,10	0,05	2,4	0,32	0,12

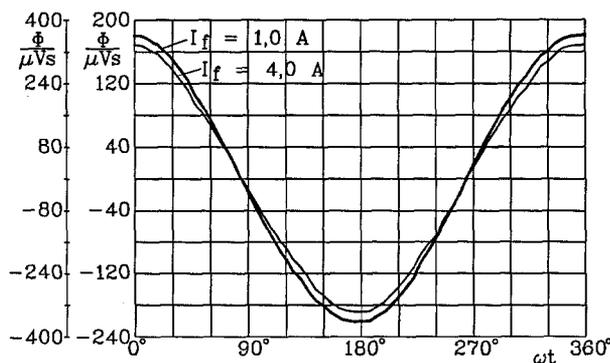


Bild 7. Statorflußverkettung

hoher Erregung bei diesem Generator die Rechnung etwas zu niedrige Werte erbringt. Bei großer Erregung ist wegen der Sättigung eine genaue Kenntnis der Magnetisierungskennlinie notwendig, um gute Ergebnisse zu erzielen.

5 Lastberechnung im Drehstrombetrieb bei Sternschaltung

Als Belastung des Generators wird zunächst ein 3phasiger ohmsch-induktiver Drahtwiderstand eingesetzt. Der Generator ist dabei in Stern geschaltet. Es wird nur die Grundschiwingung zur Berechnung des Betriebsverhaltens herangezogen. Die Oberschwingungen im Strom sind sehr klein und können daher vernachlässigt werden.

Die Ankerströme des Klauenpolgenerators müssen bei vorgegebener Erregung in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Bild 8 zeigt das Flußdiagramm zur Betriebspunktberechnung. Zu Beginn wird ein Statorstrom nach Betrag und Phase geschätzt. Dann wird eine Feldberechnung durchgeführt, wobei der geschätzte Statorstrom und der vorher festgelegte Erregerstrom eingepreßt werden. Die Auswertung der Feldberechnung ergibt die Werte der Längs-, der Quer- und der Streuinduktivität und auch der Klemmenspannung. Die geforderte Klemmenspannung läßt sich ebenfalls über die bekannte Belastungsimpedanz und den angenommenen Strom berechnen. Stimmen die beiden Spannungen überein, so ist der richtige Strom gefunden. Tritt aber eine Differenz auf, so wird zunächst für die vorher gefundenen Werte der Induktivitäten der Strom ermittelt, der für die gegebene Last das Zeigerdiagramm erfüllt. Dieser Strom wird nun wiederum in einer neuen Feldberechnung eingepreßt.

Bild 9 zeigt das Zeigerdiagramm, das zur Auswertung der Feldberechnung dient. Betrag und Phase der Ströme werden vor der Feldberechnung schon festgelegt. Aus der Luftspaltinduktion wird die induzierte Spannung im Luftspalt \underline{U}_L berechnet. Aus der Statorflußverkettung

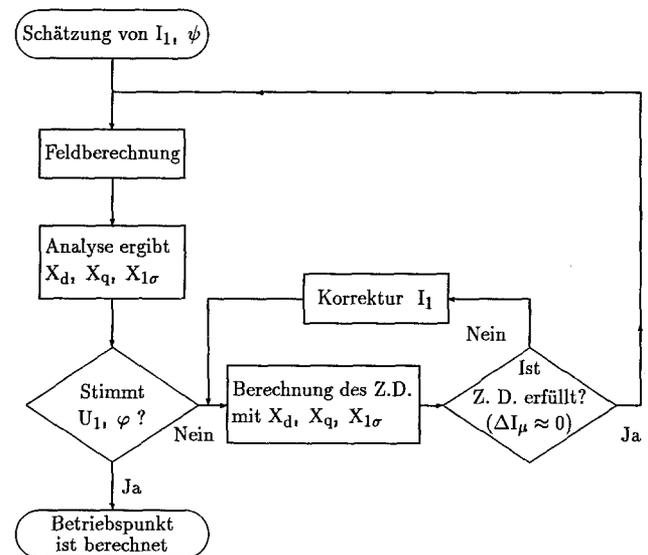


Bild 8. Flußdiagramm zur Betriebspunktberechnung

6 Gleichrichterbetrieb

Im Fahrzeug wird der Generator nicht mit einer Drehstromlast betrieben, sondern der Strom wird mit einer B6-Brücke gleichgerichtet (siehe Bild 12). Die Batterie stellt eine konstante Gegenspannung dar. Nimmt man die Batterie als ideal an, so ist es nicht notwendig, elektrische Verbraucher parallel zur Batterie in die Ersatzanordnung aufzunehmen.

Je nach Drehzahl und Erregung stellen sich verschiedene Kurvenformen für den Strangstrom und die Klemmenspannung ein. Bei niedriger Drehzahl liegt noch ein Lückbetrieb vor: Sowohl der Strang- als auch der Batteriestrom pulsiert. Mit zunehmender Drehzahl wird zunächst der Batteriestrom kontinuierlich, während der Strangstrom von einer blockförmigen Kurvenform zu einer sinusförmigen übergeht. Bei hoher Drehzahl wird der Strangstrom rein sinusförmig. Da in diesem Zustand die Polradspannung sehr viel größer als die Batteriespannung ist, wird der Generator nahezu im Kurzschluß betrieben. Damit üben die Dioden auf die Stromkurvenform keine Wirkung mehr aus, bestimmen aber weiterhin den Verlauf der Klemmenspannung (siehe auch [8]).

Kleine Ströme sind für die Auslegung und damit für die Berechnungen weniger wichtig. Für den interessierenden Bereich können typische Kurvenformen des Strangstroms und der Strangspannung angegeben werden, wie sie in Bild 13 gezeigt sind. Der Strom wird schon als sinusförmig vorausgesetzt. Allerdings tritt bei mittleren und kleinen Drehzahlen eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf, die nicht vernachlässigt werden darf.

$$\sqrt{2} U_{kl,1} = \frac{3}{\pi} U_{max} \quad U_{max} = \frac{2}{3} U = \tag{26}$$

$$I_b = \frac{1}{\pi/6} \int_{\pi/3}^{\pi/2} \sqrt{2} I_1 \sin \omega t \, d\omega t$$

$$= \frac{3}{\pi} \sqrt{2} I_1 = 1,350 I_1 \tag{27}$$

$$P_{batt} + P_{Diode} = P_1$$

$$U_b I_b + 3(U_{Schl} + R_D I_1) I_1 = 3U_{kl,1} I_1 \cos \varphi_1. \tag{28}$$

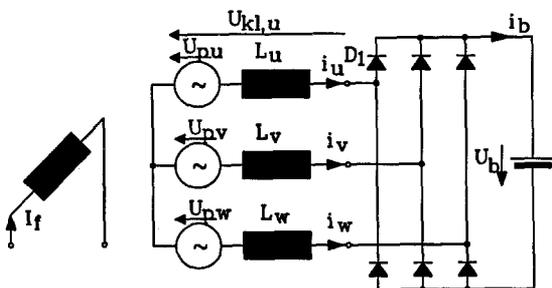


Bild 12. Ersatzanordnung des Generators im Fahrzeugbordnetz

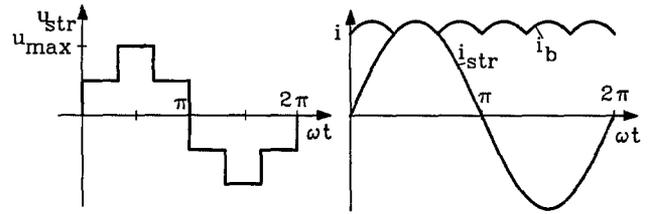


Bild 13. Typische Kurvenformen der Strangspannung und des Strangstroms

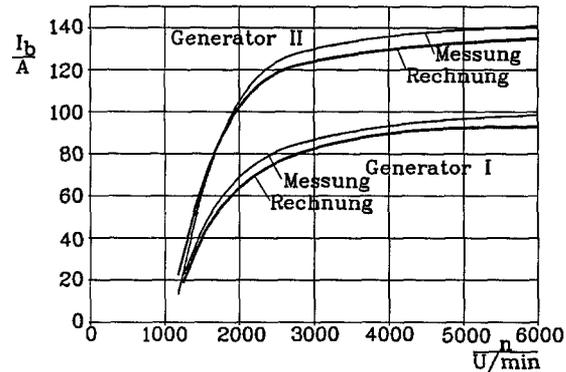


Bild 14. Lastkennlinien für 2 Generatorbaugrößen

Zwischen der Batteriespannung und der Grundschwingung der Strangspannung sowie zwischen dem Batteriestrom und der Grundschwingung des Strangstroms können über die Kurvenformen und über die Leistungsgleichheit Umrechnungsfaktoren abgeleitet werden (Gleichungen (26) bis (28)). Mit diesen Faktoren kann auch im Gleichrichterbetrieb das für die Drehstromlast entwickelte Verfahren zur Betriebspunkt-berechnung angewendet werden. Damit lassen sich die Betriebskennlinien ermitteln, die in Bild 14 dargestellt sind. Der Batteriestrom ist als Funktion der Drehzahl bei fester Erregung aufgetragen. Es sind die Lastkennlinien zwei verschiedener Generatorbaugrößen zu sehen. Bei Generator I liegen die Rechenergebnisse immer unter der Messung, während bei Generator II bei kleinen Strömen die Rechnung höhere Werte erbringt als die Messung. Bei diesem Generator ergibt im Leerlauf die Feldberechnung mehr Fluß im Stator als die Messung, wodurch sich in der Lastkennlinie die Einschalt-drehzahl nach unten verschiebt, und daraus resultierend liefert die Feldberechnung bei niedrigen Drehzahlen etwas zu hohe Stromwerte.

Bei hoher Drehzahl liegen die Rechenwerte einheitlich unter der Messung, wie schon bei der Drehstromlast. Dieser Effekt läßt sich durch Wirbelströme erklären, die in der Feldberechnung nicht berücksichtigt werden (siehe Kap. 9 [5]).

7 Simulation

Mit der Simulation können die Zeitverläufe von Strom und Spannung bei beliebiger Belastung berechnet werden. Zur Ableitung der Maschinengleichungen wird die Statorflußverkettung des Stranges U mit den oben abgeleite-

ten Induktivitätsfunktionen angeschrieben:

$$\begin{aligned}\Psi_{su}(t) &= (L_{1\sigma} + L_{uu}) i_u(t) + L_{uv} i_v(t) + L_{uw} i_w(t) + \Psi_p(t) \\ &= (L_{1\sigma} + L_h) i_u(t) + \Psi_p \cos(\omega t + \zeta) \\ &\quad - \left(\frac{L_h}{3} + L_2 \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{3} + \xi_2\right) \right) \\ &\quad + L_4 \cos\left(4\omega t - \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) i_v(t) \\ &\quad - \left(\frac{L_h}{3} + L_2 \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{3} + \xi_2\right) \right) \\ &\quad + L_4 \cos\left(4\omega t + \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) i_w(t).\end{aligned}\quad (29)$$

Daraus erhält man durch eine vollständige Differentiation nach der Zeit die induzierte Spannung mit rotatorischen und transformatorischen Gliedern:

$$\begin{aligned}u_{su}(t) &= -(L_{1\sigma} + L_h) \frac{di_u(t)}{dt} + \omega \Psi_p \sin(\omega t + \zeta) \\ &\quad + \left(\frac{L_h}{3} + L_2 \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{3} + \xi_2\right) \right) \\ &\quad + L_4 \cos\left(4\omega t - \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) \frac{di_v(t)}{dt} \\ &\quad + \left(\frac{L_h}{3} + L_2 \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{3} + \xi_2\right) \right) \\ &\quad + L_4 \cos\left(4\omega t + \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) \frac{di_w(t)}{dt} \\ &\quad - \left(2\omega L_2 \sin\left(2\omega t + \frac{\pi}{3} + \xi_2\right) \right) \\ &\quad + 4\omega L_4 \sin\left(4\omega t - \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) i_v(t) \\ &\quad - \left(2\omega L_2 \sin\left(2\omega t - \frac{\pi}{3} + \xi_2\right) \right) \\ &\quad + 4\omega L_4 \sin\left(4\omega t + \frac{\pi}{3} + \xi_4\right) i_w(t).\end{aligned}\quad (30)$$

Diese Spannungsgleichungen werden für alle drei Stränge abgeleitet und in dem kommerziellen Simulationsprogramm Pspice geeignet dargestellt. Die Maschinenklemmen werden mit der äußeren Beschaltung verbunden, die aus einer Drehstromlast oder aber aus einem Gleichrichter und der Batterie bestehen kann.

Um die Rechnungen durchführen zu können, müssen noch die Induktivitäten und deren Winkel sowie die Polradflußverkettung bestimmt werden. Die Statorstreuinduktivität wird dem Zeigerdiagramm der Betriebspunktberechnung entnommen, während der Winkel ζ im Leerlauf die Voreilung des Polradflusses gegenüber der geometrischen Polmitte angibt. Alle anderen Werte erhält man durch einen Vergleich zweier verschiedener Darstel-

lungen der Statorflußverkettung. Zum einen liefert die Feldberechnung die Flußverkettung in der Form:

$$\Psi_s(t) = w \sum_{k=1,3,5,\dots} \Phi_{s,k} \cos(k\omega t - \varrho_k).\quad (31)$$

Dabei ist der Strom als sinusförmig vorausgesetzt. Durch Einsetzen desselben Stroms in Gl. 29 und Umformen erhält man eine zweite Darstellung der Statorflußverkettung:

$$\begin{aligned}\Psi_s(t) &= \sqrt{2} I_1 \left(L_{1\sigma} \cos\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \right. \\ &\quad + \frac{4}{3} L_h \cos\left(\omega t - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \\ &\quad + L_2 \cos\left(\omega t + \xi_2 + \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \\ &\quad - \frac{L_2}{2} \cos\left(3\omega t + \xi_2 - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \\ &\quad + L_4 \cos\left(5\omega t + \xi_4 - \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \\ &\quad \left. - \frac{L_4}{2} \cos\left(3\omega t + \xi_4 + \left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \right) \\ &\quad + \Psi_p \cos(\omega t + \zeta).\end{aligned}\quad (32)$$

Ein sukzessiver Vergleich, beginnend bei den hohen Ordnungen, liefert alle noch unbekannt Parameter. Damit erhält man das Ergebnis in Tabelle 2. Die eigentliche Simulation kann jetzt durchgeführt werden. Bild 15 zeigt die Messung und die Simulation. Die Sprünge in der Klemmenspannung werden von dem Gleichrichter hervorgerufen. In der Fourieranalyse ergeben sie die 5., 7., 11. und 13. Ordnung. Die dritte Oberschwingung der Klemmenspannung wird im Generator induziert. Sie tritt

Tabelle 2. Induktivitätswerte im Drehstrombetrieb

n/min^{-1}	$\Phi_p/\mu\text{Vs}$	ζ	$L_h/\mu\text{H}$	$L_2/\mu\text{H}$	ξ_2	$L_4/\mu\text{H}$	ξ_4	$L_{1\sigma}/\mu\text{H}$
1500	444,5	3,2°	128,2	33,4	12,3°	1,9	117°	44,5
6000	680,9	3,2°	155,4	43,5	6,1°	2,6	205°	44,5

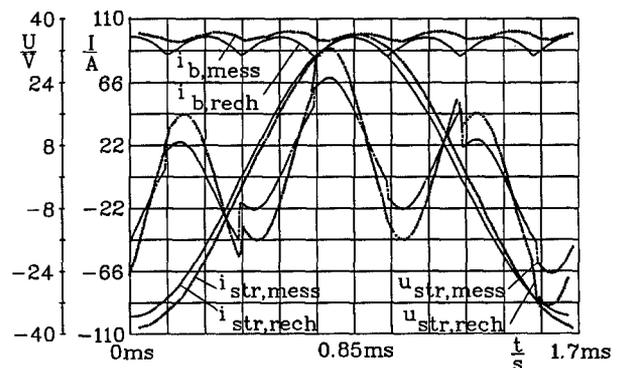


Bild 15. Simulation und Messung bei $n = 6000 \text{ min}^{-1}$

in allen drei Strängen gleichphasig auf und gibt somit in der Sternschaltung keine Leistung ab. Eine dreifache Stromüberschwingung ist nicht vorhanden. Der Strangstrom ist bei dieser Drehzahl schon sinusförmig. Der Batteriestrom besteht aus einem hohen Gleichanteil, dem ein Wechselanteil sechsfacher Frequenz überlagert ist. Die Simulation verbessert nicht den Fehler bei der dritten Oberschwingung der Strangspannung. Sie beruht auf den Ergebnissen der Feldberechnung und übernimmt daher auch den Fehler. Allerdings vermag man mit der Simulation die Kommutierungen genauer zu untersuchen.

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Methoden zur Berechnung von Drehstrom-Klauenpolgeneratoren entwickelt und angewendet.

Es werden neue Induktivitätsfunktionen abgeleitet, die sowohl die Unsymmetrie des Rotors als auch die Lochzahl $q = 1$ berücksichtigen. Die Berechnung aller Wicklungsoberwellen der Durchflutung erklärt das Entstehen einer dritten Oberschwingung der Strangspannung. Aus den Flußverkettungen wird das Zeigerdiagramm der Grundschwingung entwickelt. Das Zeigerdiagramm dient als Grundlage zur Berechnung der Betriebspunkte mit der Feldberechnung.

Die Berechnung der Leerlaufkennlinie ergibt eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten. Das Verfahren zur Betriebspunktberechnung wird zunächst auf eine Drehstromlast angewendet. Um auch das Verhalten bei Belastung mit Gleichrichter und Batterie vorherbestimmen zu können, werden Beziehungen zwischen den Gleichstrom- und den Drehstromgrößen abgeleitet, die es erlauben, das vorher für die Drehstromlast gefundene Verfahren zur Berechnung der Betriebspunkte zu verwenden. Damit kann die Lastkennlinie des Generators im Gleichrichterbetrieb bestimmt werden. Das Verfahren wird an verschiedenen Baugrößen überprüft und führt zu guten Ergebnissen.

Die Spannungsgleichungen der Maschine werden zur Simulation der Strom- und Spannungsverläufe eingesetzt. Der Generator kann sowohl im Betrieb an einer Drehstrom- als auch an einer Gleichrichterlast nachgebildet werden.

Die vorgestellten Verfahren ermöglichen eine zuverlässige Vorausberechnung des Betriebsverhaltens von Klauenpolgeneratoren. Damit ist eine Methode gefun-

den, die eine gezielte Weiterentwicklung der Generatoren erlaubt, wodurch sich der teure und aufwendige Musterbau reduzieren läßt.

Literatur

1. Blanke, H. D.: Schleifringlose Drehstrom-Klauenpolgeneratoren auf Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs. Techn. Mitt. AEG-Telefunken 60 (1970) 257–261
2. Blanke, H. D.: Synchronmaschinen. AEG-Telefunken-Handbücher, Band 12, Berlin (1970)
3. Block, R.; Henneberger, G.: Numerical calculation and simulation of a claw-pole alternator. ICEM, Manchester, Großbritannien (15.–17. September 1992)
4. Block, R.; Henneberger, G.: Simulation of the current and voltage waveforms of a claw-pole alternator. Int. Workshop on Electric and Magnetic Fields, Liège, Belgien (28.–30. September 1992)
5. Block, R.: 3dimensionale numerische Feldberechnung und Simulation eines Klauenpolgenerators. Diss. RWTH Aachen. Verlag Shaker Aachen (1993)
6. Bosch, Technische Unterrichtungen, Drehstromgeneratoren. Robert Bosch GmbH, Stuttgart
7. Brauer, J. R.; Zimmerlee, G. A.; Bush, T. A.; Sandel, R. J.; Schultz, R. D.: 3D finite element analysis of automotive alternators under any load. IEEE Transactions on Magnetics 24 (1988) 500–503
8. Eggert, B.: Grundlagen und Kennlinien der über Drosselspulen ans Netz geschalteten ungesteuerten sechspulsigen Brückenschaltung. etz Archiv 10 (1988) 123–130
9. Henneberger, G.: Elektrische Motorausrüstung. Vieweg-Verlag Braunschweig (1990)
10. Søk, A. J.: Numerische Berechnung des Magnetfeldes in einem Klauenpolgenerator. Wiss. Zeitschrift TU Dresden 37 (1988) 113–115
11. Tamura, Y.; Tadakuma, S.: Analysis of characteristics of claw-pole commutatorless motor using equivalent magnetic circuit. Electr. Eng. in Japan 105 (1985) 80–88
12. Teichgräber, U.: Beitrag zur Theorie der Klauenpolmaschine. Diss. TU Hannover (1973)
13. Zeisler, F. L.; Brauer, J. R.: Automotive alternator electromagnetic calculations using three dimensional finite elements. IEEE Transactions on Magnetics 21 (1985) 2453–2456

Eingegangen am 2. Februar 1993

Dipl.-Ing. S. Küppers
 Dr.-Ing. R. Block
 Prof. Dr.-Ing. G. Henneberger
 Institut für Elektrische Maschinen
 RWTH Aachen
 Schinkelstr. 4
 52056 Aachen
 Deutschland