Verlust- und Erwärmungsberechnung im Käfiganker von Asynchronmaschinen beim dynamischen Betrieb

Autor(en): **Meyer, A. / Meister, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 23

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905449

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Verlust- und Erwärmungsberechnung im Käfiganker von Asynchronmaschinen beim dynamischen Betrieb

Von A. Meyer und J. Meister

621.313.333.2.043:621.3.017.001.2:621.3.017.72.001.2

Einleitend werden die Verluste für den in Teilstäbe aufgeteilten Nutenleiter des Käfigankers unter Berücksichtigung der Stromverdrängung berechnet. Der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der Teilstäbe wird dabei Rechnung getragen. Die thermischen Ausgleichsvorgänge werden mit Hilfe eines Wärmenetzwerkes für den Nutenbereich untersucht. Das thermische Differentialgleichungssystem wird numerisch integriert; es resultieren die Erwärmungen der Teilleiter, des Zahnes und des Jochs. Als Beispiele werden für eine 5222-kW-Asynchronmaschine die Staberwärmungen im Stillstand und für drei aufeinanderfolgende Hochläufe ermittelt.

Pour commencer on calcule les pertes pour les barres rotoriques fractionnées en barres partielles, en tenant compte de l'effet pelliculaire, ainsi que d'une résistivité spécifique propre à chaque barre dépendant de la température. Le phénomène thermique transitoire est examiné à l'aide d'un réseau de chaleur autour de l'encoche rotorique. Le système d'équations différentielles thermiques est intégré numériquement; il en résulte l'échauffement des conducteurs partiels, de la dent et de la culasse. Comme exemples, on détermine l'échauffement des barres avec le rotor calé et pour trois démarrages successifs d'une machine asynchrone de 5222 kW.

1. Einleitung

Die Bestimmung der Staberwärmung im Käfiganker ist vor allem bei mittleren und grossen Asynchronmaschinen von Bedeutung. Zur Erreichung möglichst hoher Anlaufdrehmomente bei kleinem Einschaltstrom werden als Nutenleiter Hochstäbe bis etwa 60 mm Höhe eingesetzt. Die vor allem in der Anfangsphase des Hochlaufvorganges sehr ausgeprägte Stromverdrängung ist mit einer ungleichen Stromverteilung im Stab verbunden und führt zu grossen Temperaturdifferenzen zwischen der Staboberkante und Stabunterkante. Die Erfassung dieser ungleichen Staberwärmung ist für die Dimensionierung der Asynchronmaschinen unerlässlich. Einerseits ist, insbesondere bei explosionsgeschützten Maschinen, die zulässige Staberwärmung vorgeschrieben, andererseits sind die im Stab auftretenden mechanischen Beanspruchungen zu überprüfen.

Die Erwärmung der Rotorstäbe sowie die mechanischen Spannungen in den Stäben während des Anlaufes wurden von Rossmaier [1] und Schuisky [2; 3] bereits sehr früh untersucht. Für die Lösung der Differentialgleichungen waren aber Vereinfachungen erforderlich, wie konstante Temperatur des Eisens, temperaturunabhängige elektrische Leitfähigkeit usw. Für dynamische Vorgänge wurde in [4] eine Lösung vorgeschlagen, die zu einem geschlossenen Differentialgleichungssystem führt, das das transiente Verhalten der Asynchronmaschine wie auch die thermischen Ausgleichsvorgänge beinhaltet. Die entsprechend umfangreichen Systemgleichungen werden schrittweise integriert, wobei allerdings wiederum die elektrische Leitfähigkeit als temperaturunabhängig vorausgesetzt wird.

Die im folgenden beschriebene Lösung verfeinert das von Motorenherstellern üblicherweise angewendete Rechenverfahren nach [1; 2; 3] durch die Berücksichtigung der erwähnten bisherigen Vereinfachungen. Einzig die transienten Ausgleichsströme bei den dynamischen Vorgängen werden vernachlässigt. Da diese mit Zeitkonstanten, die praktisch immer kleiner als eine Sekunde sind, abklingen, beeinflussen sie auch die thermischen Ausgleichsvorgänge, die wesentlich langsamer vor sich gehen, kaum.

Die Verlustberechnung erfolgt mit den quasistationären Strömen im Käfigstab, die sinusförmig verlaufen. Diese, wie auch die Drehzahl der Asynchronmaschine, sind aus der Berechnung des dynamischen Verhaltens des Antriebes, z. B. des Hochlaufes, als Funktion der Zeit gegeben. Durch eine Aufteilung des Nutenleiters in einzelne Teilleiter, deren Verlustanteile in jedem Zeitaugenblick berechnet werden, sind die Voraussetzungen für die Berechnung der thermischen Ausgleichsvorgänge im Käfiganker mit Hilfe eines Wärmenetzwerkes gegeben. Dabei werden die Zahnerwärmung sowie die Jocherwärmung berücksichtigt. Ebenfalls wird die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitwerte der einzelnen Teilstäbe mit in die Berechnung einbezogen, da diese infolge der grossen Temperaturunterschiede die Verluste wesentlich beeinflusst. Das resultierende thermische Differentialgleichungssystem ist nicht sehr umfangreich und deshalb auch für die numerische Simulation zeitlich längerer Vorgänge geeignet.

2. Verluste im Stab

2.1 Stromdichte

Das magnetische Streufeld des im Nutenleiter fliessenden elektrischen Stromes I verursacht im Leiter Wirbelströme, die zu einer über der Leiterhöhe veränderlichen Stromdichte führen. Insbesondere im Aktivteil wird durch das Eisen die Feldstärke des magnetischen Streufeldes wesentlich vergrössert, so dass die Stromdichte gegen den Luftspalt stark zunimmt und eine ausgeprägte Stromverdrängung auftritt. Infolge der Rückwirkung der Wirbelströme auf das ursprüngliche Feld wird auch das magnetische Feld verdrängt (Fig. 1).

Bei gegebener Nutengeometrie ist die Stromdichte als Funktion der Stabhöhe gegeben durch die Beziehung [5; 6; 7]:

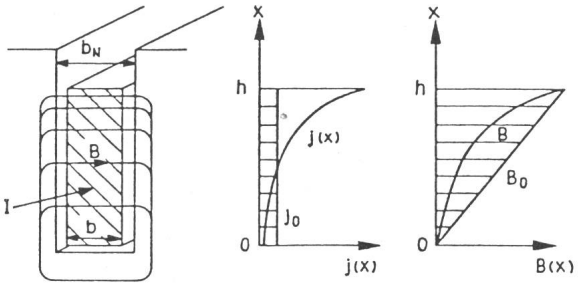

Fig. 1 Strom- und Feldverdrängung im Stab der Käfiganker-Asynchronmaschine

I Leiterstrom
B, B_0 Induktion bei Wechselstrom, Gleichstrom
j, j_0 Stromdichte bei Wechselstrom, Gleichstrom
b_N Nutbreite
b, h Stabbreite, Stabhöhe

$$j(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega_2 \cdot \mu \cdot \varkappa}{\beta} \cdot \frac{1}{b_N} \cdot I \sqrt{\frac{\cosh 2\beta x + \cos 2\beta x}{\cosh 2\beta h - \cos 2\beta h}} \quad (1)$$

Dabei ist μ gleich der Permeabilität und $\varkappa$ gleich der elektrischen Leitfähigkeit. Die Kreisfrequenz des Stabstromes ω_2 ist mit der Schlupffrequenz f_2 gegeben:

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2 = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \quad (2)$$

Ebenfalls wird der Strom I im Stab in jedem Zeitaugenblick als bekannt angenommen.

Die Konstante

$$\beta = \sqrt{\pi \cdot f_2 \cdot \mu \cdot \varkappa \cdot \frac{b}{b_N}} = \frac{1}{\delta} \quad (3)$$

ist der reziproke Wert, der in der Literatur häufig mit Eindringmass bezeichneten Grösse δ. Die geometrischen Grössen b und b_N entsprechen dabei der Stab- und Nutbreite. Die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit $\varkappa$ von der Temperatur ϑ wird berücksichtigt mit der Funktion

$$\varkappa(\vartheta) = \frac{\varkappa_{20}}{1 + \alpha_e (\vartheta - 20\,^0\mathrm{C})} \quad (4)$$

wobei $\varkappa_{20}$ gleich der elektrischen Leitfähigkeit des Stabes bei 20 °C und α_e gleich dem Temperaturkoeffizienten des Stabmaterials ist.

2.2 *Verlustaufteilung*

Die Verluste im Nutenleiter werden infolge der Stromverdrängung um die Wirbelstromverluste grösser als die ohmschen Verluste im Leiter bei gleichmässiger Stromverteilung. Dadurch ergibt sich ein, verglichen mit dem Gleichstromwiderstand R_{St}, grösserer Wirkwiderstand des Stabes. Aus der Integration über die Leiterhöhe

$$P_v(x) = \frac{b \cdot l}{\varkappa} \cdot \int_0^h j^2(x)\, dx \quad (5)$$

folgen die Gesamtverluste im Stab

$$P_{v\,tot} = h \cdot \beta \cdot R_{St} \cdot I^2 \cdot \left(\frac{\sinh 2\beta h + \sin 2\beta h}{\cosh 2\beta h - \cos 2\beta h}\right) \quad (6)$$

wobei mit l die Länge des untersuchten Stabes bezeichnet ist und R_{St} dem Gleichstromwiderstand des Stabes entspricht

$$R_{St} = l/(b \cdot h \cdot \varkappa) \quad (7)$$

Bei ausgeprägter Stromverdrängung im Nutenleiter, insbesondere in der Anfangsphase des Hochlaufes der Asynchronmaschine, wird an der Staboberkante die Stromdichte verglichen mit dem mittleren Wert sehr gross (Fig. 1). Dies führt nach der Beziehung (5) ebenfalls zu einer im Nutenleiter sehr ungleichen Verlustaufteilung mit grossen Verlusten an der Staboberkante und kleinen Verlusten an der Stabunterkante. Soll die Erwärmung des Stabes als Funktion der Leiterhöhe ermittelt werden, ist es zweckmässig, diesen in einzelne Teilleiter zu zerlegen [8] und jedem Teilleiter entsprechende Verluste zuzuordnen. Dieses Vorgehen hat die folgenden Vorteile:

– Die Anordnung Stab–Nut kann man mit Hilfe eines Netzwerkes zur Berechnung der dynamischen Erwärmung untersuchen.

– In jedem Teilleiter werden die Verluste für die aktuelle Teilleitertemperatur berechnet, d. h., der Leitwert $\varkappa$ wird entsprechend der Beziehung (4) korrigiert.

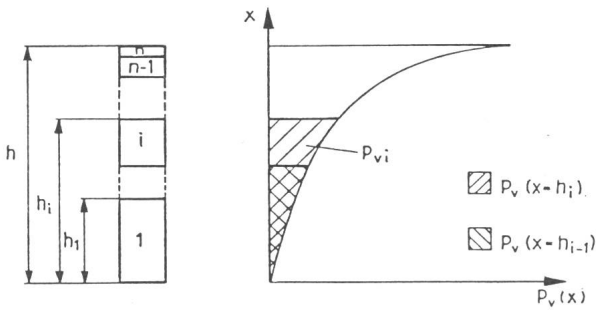

Fig. 2 Aufteilung des Nutenleiters in *n* Teilleiter

h_i	Höhe der *i*-untersten Teilleiter
P_v $(x = h_i)$	Verluste in den *i*-untersten Teilleitern
P_v $(x = h_{i-1})$	Verluste in den *i*–1-untersten Teilleitern
P_{vi}	Verluste im *i*-ten Teilleiter

– Die Konstante β in Gleichung (3), die ein Mass für die Stromverdrängung ist, wird für die im Teilleiter aktuelle Temperatur ermittelt. Damit ist berücksichtigt, dass mit zunehmender Leitertemperatur die Stromverdrängung und damit die zusätzlichen Wirbelstromverluste vermindert werden.

– Die Staberwärmung als Funktion der Nutenleiterhöhe lässt sich durch entsprechende Aufteilung beliebig genau ermitteln. Dies erlaubt die Untersuchung der im Stab wirkenden mechanischen Spannungen infolge der ungleichmässigen Erwärmung.

Die Fig. 2 zeigt die Abhängigkeit der Verluste von der Stabhöhe und die Aufteilung des Nutenleiters in n Teilleiter. Die Aufteilung des Stabes wird zweckmässig gegen die Staboberkante verfeinert, um die stark ändernde Stromdichte zu berücksichtigen. Die Verluste als Funktion der Stabhöhe x werden nach der Integration der Beziehung (5) zu

$$P_v(x) = x \cdot \beta \cdot R_x \cdot I^2 \cdot \left(\frac{\sinh 2\beta x + \sin 2\beta x}{\cosh 2\beta x - \cos 2\beta x}\right) \quad (8)$$

mit

$$R_x = l/(b \cdot x \cdot \varkappa) \qquad \beta = \sqrt{\pi \cdot f_2 \cdot \mu \cdot \varkappa \cdot b/b_N} \quad (9)$$

R_x entspricht dem ohmschen Widerstand des Teilleiters mit der Höhe x.

Die tatsächlichen Verluste im Leiter i allein ergeben sich aus der Differenz der Verluste P_v $(x = h_i)$ in den i untersten Leitern und der Verluste P_v $(x = h_{i-1})$ in den $(i - 1)$ untersten Leitern. Deshalb folgt für die Verluste in den n Teilleitern (Fig. 2):

$$\begin{aligned} P_{v1} &= P_v\,(x = h_1) \\ P_{v2} &= P_v\,(x = h_2) - P_v\,(x = h_1) \\ P_{vi} &= P_v\,(x = h_i) - P_v\,(x = h_{i-1}) \\ P_{vn} &= P_v\,(x = h_n) - P_v\,(x = h_{n-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

Mit diesem Gleichungssystem sind die Verluste in den n Teilleitern gegeben. Man darf allerdings nicht übersehen, dass bei der Verlustberechnung nach den Beziehungen (8) bis (10) die aktuelle Temperatur im betrachteten Teilleiter berücksichtigt werden muss, d. h., dass zum Beispiel im i-ten Teilleiter die Leitfähigkeit entsprechend der Temperatur

$$\vartheta_i = t_0 + \Delta\vartheta_i \quad (11)$$

zu berechnen ist. t_0 entspricht dabei der Bezugstemperatur und $\Delta\vartheta_i$ der Erwärmung im i-ten Stab.

3. Erwärmung im Stab

3.1 Wärmenetzwerk

Bei der Berechnung thermischer Ausgleichsvorgänge im Nutenbereich, die innerhalb einiger 10 s abgeschlossen sind (z.B. Hochlauf der Asynchronmaschine), ist es zulässig, die Wärmeabgabe der Rotorstäbe an das Kühlmittel gegenüber derjenigen an das Blechpaket zu vernachlässigen. Die Erwärmungsvorgänge im Stab und im Eisen lassen sich adiabatisch untersuchen; d.h., als einzige Wärmespeicher werden der Käfig und das Blechpaket betrachtet.

Die vorliegenden Untersuchungen gelten zudem für den Nutenleiter im aktiven Eisen; axiale Wärmeströmungen werden vernachlässigt. Damit ergibt sich das in Fig. 3 dargestellte zweidimensionale Wärmenetzwerk für den Nutenbereich des Käfigankers.

Für die Verlustberechnung und die Aufstellung des Wärmenetzwerkes ist es zweckmässig, Hochstäbe von bis zu 60 mm Höhe in 7 Teilleiter aufzuteilen, wobei die Aufteilung gegen den Luftspalt hin zu verfeinern ist. Eine weitere Aufteilung ist ohne weiteres möglich, ändert aber an den Resultaten nur wenig [8]. Da die Wärmeleitfähigkeit im Eisen relativ klein ist, wird der Zahn in eine obere und untere Hälfte aufgeteilt. Zusätzlich wird die Wärmeleitfähigkeit vom Nutenleiter zum Joch und vom Zahn zum Joch berücksichtigt.

Die Wärmekapazitäten lassen sich in üblicher Weise aus der Masse des betreffenden Teils und seiner spezifischen Wärmekapazität bestimmen. Die Wärmeleitwerte können über die wirksame Durchtrittsfläche und die spezifische Wärmeleitfähigkeit nach [9; 10] berechnet werden.

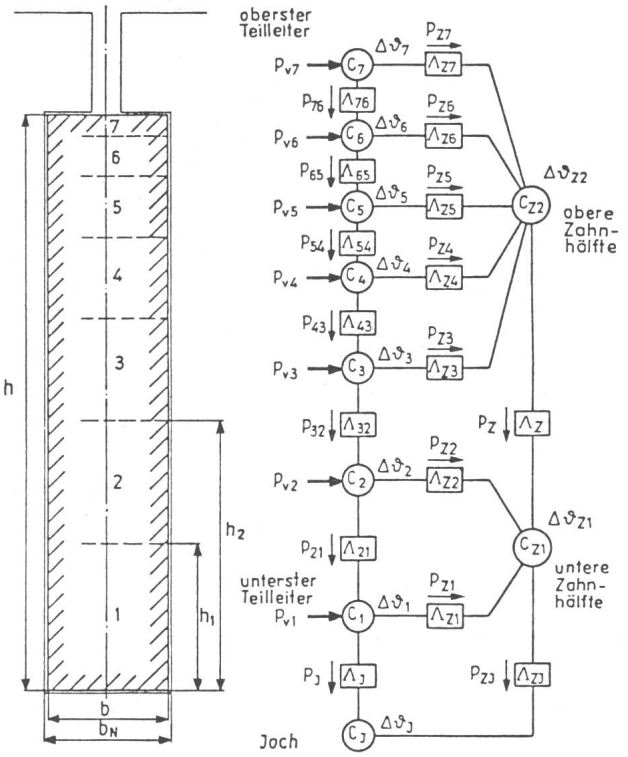

Fig. 3 Rotornut und entsprechendes Wärmenetzwerk

h	Stabhöhe
b_N, b	Nutbreite, Stabbreite
$P_{v1} \ldots P_{v7}$	Verluste in den Teilleitern
$P\ldots$	Wärmeströme
$C\ldots$	Wärmekapazitäten
$\Lambda\ldots$	Wärmeleitwerte
$\Delta\vartheta\ldots$	Erwärmungen gegenüber der Bezugstemperatur

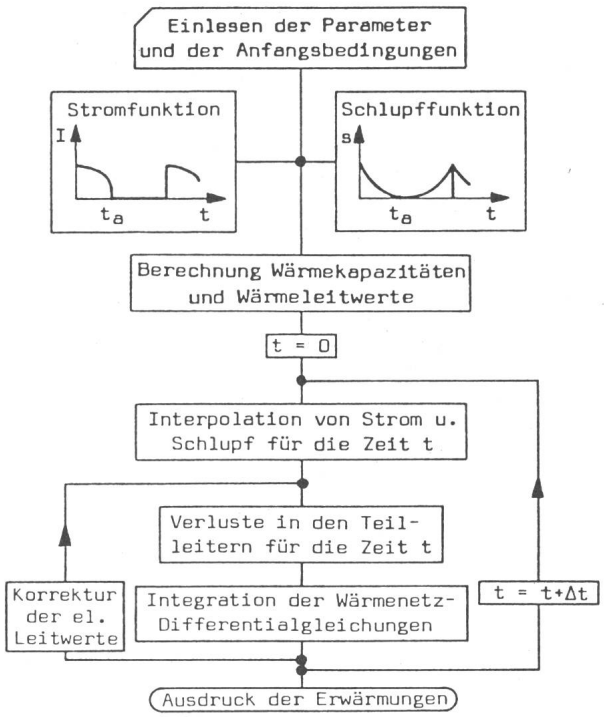

Fig. 4 Flussdiagramm der numerischen Berechnungen

3.2 Lösung des thermischen Differentialgleichungssystems

Für einen Körper gilt im nichtstationären Betrieb jederzeit, dass die im Zeitelement dt zugeführte Wärmemenge gleich ist der Summe der vom Körper durch Wärmeleitung abgeführten Wärmemenge und der in der Wärmekapazität C gespeicherten Wärmemenge. Daraus ergibt sich beispielsweise für den Knoten 1 (C_1) im Wärmenetz in Fig. 3:

$$P_{v1} = C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + P_{Z1} + P_J - P_{21} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } P_{Z1} &= \Lambda_{Z1} \cdot (\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_{Z1}) \\ P_J &= \Lambda_J \cdot (\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_J) \\ P_{21} &= \Lambda_{21} \cdot (\Delta\vartheta_2 - \Delta\vartheta_1) \end{aligned} \tag{13}$$

Für jeden weiteren Knoten können analoge Differentialgleichungen formuliert und zu einem linearen System zusammengefasst werden. Die Verlustleistungen in den einzelnen Teilleitern P_{v1}, $P_{v2} \ldots P_{v7}$ sind aus der Verlustberechnung (Kap. 2) für jeden Zeitpunkt gegeben. Aus einer schrittweisen Integration der thermischen Differentialgleichungen mit Hilfe eines CSMP III-Rechenprogrammes resultieren die Erwärmungen $\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2 \ldots \Delta\vartheta_7$ der Teilleiter, die Erwärmungen der beiden Zahnhälften $\Delta\vartheta_{Z1}$, $\Delta\vartheta_{Z2}$ sowie die Erwärmung des Joches $\Delta\vartheta_J$ als Funktion der Zeit.

Fig. 4 zeigt das Flussdiagramm des Rechenprogrammes für die Simulation der thermischen Ausgleichsvorgänge im Stab des Käfigankers. Die Zeitfunktionen des Stabstromes sowie des Schlupfes, die z.B. das Resultat einer Hochlaufberechnung sind, sowie die Maschinenparameter und Anfangsbedingungen werden eingelesen. Es folgt die Berechnung der Wärmekapazitäten und Wärmeleitwerte. Anschliessend werden für jeden Zeitpunkt die Teilleiterverluste nach Kapitel 2 berechnet, wobei man den Stabstrom und den Schlupf den Zeitfunktionen entnimmt.

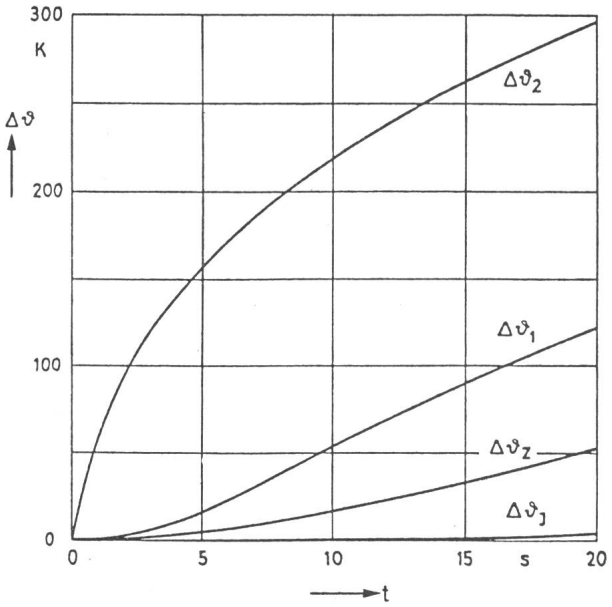

Fig. 5 Stab- und Zahnerwärmungen als Funktion der Zeit im Stillstand der Asynchronmaschine

Für eine Bezugstemperatur von 25 °C

$\Delta\vartheta_1$ Erwärmung Stabunterkante
$\Delta\vartheta_2$ Erwärmung Staboberkante
$\Delta\vartheta_J$ Erwärmung Rotorjoch
$\Delta\vartheta_Z$ Mittlere Erwärmung Rotorzahn

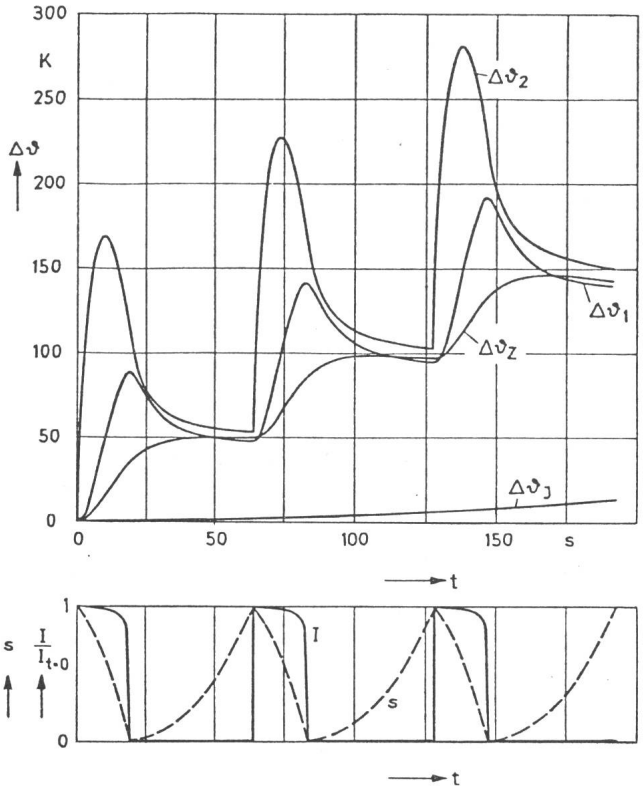

Fig. 6 Stab- und Zahnerwärmungen als Funktion der Zeit für 3 Hochläufe der Asynchronmaschine

Bei einer Bezugstemperatur von 25 °C

$\Delta\vartheta_1$ Erwärmung Stabunterkante
$\Delta\vartheta_2$ Erwärmung Staboberkante
$\Delta\vartheta_J$ Erwärmung Rotorjoch
$\Delta\vartheta_Z$ Mittlere Erwärmung Rotorzahn
s Schlupf der ASM
I Stabstrom der ASM

Kenngrössen der untersuchten Asynchronmaschine QWG 900

Tabelle I

Kenngrösse	Einheit	QWG 900
P_n	kW	5 222
$\sqrt{3}\,U_n$	V	13 200
I_{1n}	A	267
I_{2n} [1])	A	7 050
f_n	Hz	60
n_n	min^{-1}	893
$2p$	—	8
t_a [2])	s	19,4
h [3])	mm	50

[1]) Stabstrom im Stillstand
[2]) Hochlaufzeit
[3]) Stabhöhe

Schrittweise wird das beschriebene thermische Differentialgleichungssystem gelöst, und es resultieren die Erwärmungen. Mit einer Rückkoppelung wird erreicht, dass sich nach Gleichung (4) die elektrischen Leitwerte bei der Verlustberechnung stets der entsprechenden Temperatur anpassen.

4. Rechenbeispiele

4.1 Stillstehende Asynchronmaschine

Der Verlauf der Erwärmungen im Nutenleiter (als Funktion der Zeit) bei der stillstehenden Asynchronmaschine ist ein wichtiges Kriterium bei der Festlegung der zulässigen Stillstandszeit, d. h. der Zeitdauer, die eine Maschine ohne Schaden zu nehmen unter voller Spannung blockiert sein darf. Fig. 5 zeigt die Erwärmung der Staboberkante, Stabunterkante, der Rotorzähne sowie des Rotorjochs für die Asynchronmaschine mit den Daten von Tabelle I.

Die resultierende Temperaturdifferenz über der Stabhöhe führt zu mechanischen Beanspruchungen des Nutenleiters. Diese Beanspruchungen – die Berechnung ist relativ einfach – sowie die resultierenden Erwärmungen beschränken die zulässige Stillstandszeit.

4.2 Hochlauf der Asynchronmaschine

Vor allem bei Antrieben mit grossen Schwungmassen wird der Käfiganker während des Hochlaufs thermisch wie mechanisch stark beansprucht. Da häufig zudem gegen ein grosses Gegendrehmoment hochgefahren werden muss und bis zu drei Hochläufe vorgesehen sind, ist die Erwärmungsrechnung für den Nutenleiter sorgfältig durchzuführen, um unzulässige mechanische Stabspannungen zu verhindern. Fig. 6 zeigt am Beispiel der Asynchronmaschine mit den Daten von Tabelle I die Ergebnisse der Berechnungen für drei Hochläufe. Der Schlupf s sowie der Stabstrom I als Funktion der Zeit sind Resultate der Hochlaufberechnung und wurden direkt in das Simulationsprogramm eingelesen. Die Hochlaufzeit beträgt bei diesem Antrieb mit sehr grossem Schwungmoment 19,4 s. Als Beispiel wird der Antrieb 64 s nach dem ersten Start aus dem Stillstand ein zweites und anschliessend ein drittes Mal gestartet. Die Erwärmung des Nutenleiters ist insbesondere während der Hochlaufphasen über die Höhe sehr unterschiedlich. Die Staboberkante wird bis zu 120 K wärmer als die Stabunterkante. Infolge der starken Abnahme der Stromverdrängung gegen Ende der Hochläufe und dank der relativ guten thermischen Leitfähigkeit des Kupfers ist die Erwärmung

im Hochstab nach dem Erreichen der Nenndrehzahl praktisch ausgeglichen. Das Rotorjoch und die Rotorzähne werden infolge der wesentlich grösseren Wärmekapazitäten weit weniger erwärmt als die Nutenleiter.

5. Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Modell ermöglicht die zeitliche Simulation der thermischen Ausgleichsvorgänge im Käfiganker von Asynchronmaschinen bei dynamischen Vorgängen wie Hochlauf, Reversierbetrieb, Überlast usw. Die resultierenden Staberwärmungen erlauben eine sichere Dimensionierung von Käfigankern für Schweranläufe durch Untersuchung der mechanischen Spannungen, hervorgerufen durch das Temperaturgefälle im Stab. Ebenfalls ist durch die Vorausbestimmung der maximalen Stabtemperatur gewährleistet, dass der z. B. für explosionsgeschützte Motoren gültige zulässige Wert nicht überschritten wird.

Literatur

[1] *V. Rossmaier:* Der Temperaturverlauf in einem Stab eines Stromverdrängungs-Käfigläufermotors in Abhängigkeit von Ort und Zeit während des Hochlaufes. Arch. Elektrotechn. 32(1938)2, S. 124...131.

[2] *W. Schuisky:* Erwärmung der Stäbe eines Kurzschlusskäfigs beim Anlauf. Arch. Elektrotechn. 41(1953)2, S. 103...112.

[3] *W. Schuisky:* Temperaturverteilung im Hochstab von Induktionsmotorenläufern beim Anlauf. E und M 70(1953)23, S. 521...525.

[4] *H. Güntner:* Die Läufererwärmung beim dynamischen Betrieb von Käfiganker-Asynchronmaschinen. Arch. Elektrotechn. 58(1976)6, S. 349...358.

[5] *K. Küpfmüller:* Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 10. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1973.

[6] *A. B. Field:* Eddy-currents in large slot-wound conductors. Proc. AIEE 24(1905)7, p. 659...686.

[7] *W. V. Lyon:* Heat losses in the conductors of alternating-current machines. J. AIEE 40(1921)1, p. 398...410.

[8] *A. Meyer:* Einfluss der Stromverdrängung auf den stationären Betrieb und die erzwungenen Pendelungen von Asynchronmaschinen. Brown Boveri Mitt. 63(1976)8, S. 500...507.

[9] *E. Wiedemann* und *W. Kellenberger:* Konstruktion elektrischer Maschinen. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 1967.

[10] *W. Schuisky:* Berechnung elektrischer Maschinen. Wien, Springer-Verlag, 1960.

Adresse des Autors

Dr. sc. techn. *Armin Meyer*, dipl. El.-Ing. ETHZ, und *Jörg Meister*, Ing. HTL, BBC AG Brown Boveri & Cie, Abt. TAM-E, 5401 Baden.

Literatur – Bibliographie

DK: 621.362 : 621.472 : 620.92 SEV-Nr. A 752

Engineer's guide to solar energy. By: *Yvonne Howell and Justin A. Bereny*. San Mateo/California, Solar Energy Information Service, 1979; 4°, VIII/323 p., fig., tab. Price: stitched $ 27.50

Das Buch enthält eine Einführung in die Sonnenenergie-Technologien mit Schwergewicht auf Sonnenkollektoranlagen für die Raumheizung und Warmwasserbereitung. Es richtet sich insbesondere an den amerikanischen Ingenieur, der Kollektoranlagen erstellen möchte. Mit den vielen ausführlichen Tabellen und sogar einer Liste der möglichen Lieferanten in den USA kann es als eigentliches Handbuch verwendet werden.

Im allgemeinen Teil werden zuerst die wichtigsten Sonnenenergie-Technologien beschrieben: Kollektoren für Warmwasser sowie Hochtemperaturanlagen, photoelektrische Systeme, Windenergie, Wärmeentnahme aus dem Ozean (vertikales Temperaturgefälle), Biomasse. Anschliessend erläutern die Autoren die Besonderheiten der verfügbaren Sonnenenergie, ergänzt mit umfangreichen Tabellen über die weltweite Sonneneinstrahlung. Dann werden Möglichkeiten der passiven Sonnenenergietechnik anhand zahlreicher interessanter Beispiele diskutiert.

Es folgen beschreibende Kapitel über Sonnenkollektoren, Wärmespeicher und Solaranlagen. Hier wird auch kurz auf die Wärmepumpen eingegangen. Eingehender wird dagegen die Wärmebilanz von Gebäuden und deren Berechnung behandelt. Als Grundlage für die Auslegung der Solaranlagen wird der genauen und detaillierten Bestimmung von Wärmegewinn und Wärmeverlust grosses Gewicht beigemessen. Nicht weniger als 15 verschiedene Computerprogramme und Methoden werden aufgeführt und deren Prinzipien beschrieben. Das letzte, umfangreiche Kapitel enthält eine ausführliche Anleitung zur schrittweisen Berechnung von Solaranlagen mittels der sog. *f*-Chart-Methode. Diese beruht auf einem allgemein gültigen Diagramm, in welchem *f* den Anteil der gesamten Belastung bedeutet, der vom Solarsystem in einem Monat geliefert wird.

Das Buch ist für den Praktiker geschrieben. Zahlreiche bibliographische Angaben ermöglichen dem interessierten Leser jedoch, das eine oder andere Thema zu vertiefen. Die umfangreichen praxisbezogenen Angaben des Buches und der Einblick in den Stand der Sonnenenergietechnik in den USA sind sicher auch für europäische Ingenieure von Interesse. *Eb*

DK: 621.311.62 : 621.38 SEV-Nr. A 759

Stromversorgungen für die Elektronik. Von *Hans Stiefken*. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1979; 8°, VI/130 S., Fig., Tab. – Preis: kart. DM 24.80

Es ist nicht leicht zu verstehen, was für einen Zweck das vorliegende Buch erfüllen möchte. Anwender von Stromversorgungen, die sich einer Vielfalt von Typen und Ausführungen gegenübergestellt sehen, können die wenigen Seiten am Schluss des Buches über die Beurteilung von Stromversorgungen in keiner Weise befriedigen oder bei der Auswahl wesentlich unterstützen. Für Service-Techniker und andere Fachleute, die die Wirkungsweise der verschiedenen Stromversorgungen verstehen möchten, bringt das Buch nichts anderes, als was schon oft sowohl in der Fachliteratur wie auch in vielen Anwendungsberichten der Halbleiterhersteller publiziert worden ist. Und schliesslich ist für den Ingenieur, der Stromversorgungen entwickeln möchte, die Darstellung zu wenig detailliert. Dimensionierungsunterlagen und Beispiele mit numerischen Werten fehlen, und auch die Schaltungen sind oberflächlich dargestellt. Von wichtigen Themen wie der Beschaltung von Halbleitern, der Ansteuerung von Höchstleistungstransistoren und Schutzmassnahmen wird wenig gesagt, und Bauelemente wie schnelle Thyristoren und MOS-Leistungstransistoren werden nicht einmal erwähnt. Die Hinweise auf die einschlägige Literatur sind mangelhaft.

Ein Kuriosum stellt die Behauptung dar, dass sich Gegentakt-Durchflusswandler nur für Leistungen unterhalb 100 W eignen. Dabei ist es genau dieser Schaltungstyp, der meistens für Hochleistungswandler eingesetzt wird. *Erik W. Aslaksen*