Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik

Band: 97 (2006)

Heft: 24-25

Artikel: Temperaturvorausberechnung an oberflächengekühlten Asynchronmotoren

Autor: Lehrmann, Christian

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857756

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Temperaturvorausberechnung an oberflächengekühlten Asynchronmotoren

Ein Baustein zur Optimierung des neuen Zulassungskonzeptes für explosionsgeschützte, umrichtergespeiste Asynchronmaschinen

Umrichtergespeiste Antriebe dringen aufgrund der mit ihrem Einsatz verbundenen Energieeinsparungspotenziale in immer grössere Einsatzbereiche in der industriellen Anwenderpraxis vor. Auch in explosionsgefährdeten Bereichen steigt ihr Anteil, sodass dem Prüf- und Zertifizierungsaufwand eine immer grössere Bedeutung zukommt. Bezüglich der mechanischen Ausführung lassen sich Motoren in der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» in der Regel deutlich kostengünstiger fertigen als Motoren der Zündschutzart «Druckfeste Kapselung». Der Prüfaufwand war hier jedoch in der Vergangenheit erheblich höher als bei der «Druckfesten Kapselung», da Motor und Umrichter nur in Kombination geprüft werden konnten und die Anpassungsmöglichkeiten durch den Betreiber daher stark eingegrenzt waren. Bei Reparaturen konnten in der Vergangenheit Motor und Umrichter nur durch baugleiche Teile ersetzt werden, ansonsten war eine neue Prüfung des Antriebssystems nötig.

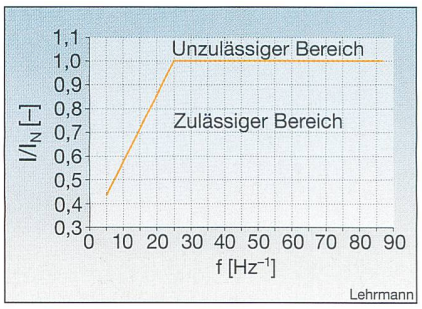


Bild 1 Drehzahlvariable Strombegrenzung

Basierend auf den Erfordernissen des Marktes wurde daher ein neues Zulassungsverfahren entwickelt, welches die feste Kopplung des Frequenzumrichters an den Motor aufhebt. Der Schutz des Motors vor unzulässigen Erwärmungen

Christian Lehrmann

wird dabei durch eine drehzahlvariable Motorstrombegrenzung zusammen mit einer Wicklungstemperaturüberwachung mittels Kaltleiter sichergestellt [1]. Zentraler Punkt ist dabei die drehzahlvariable Strombegrenzung, die z.B. gemäss Bild 1 realisiert wird [2]. Die Eckpunkte der Kennlinie wurden dabei basierend auf Erwärmungsmessungen festgelegt.

Dieses Verfahren ist mit vertretbarem Aufwand handhabbar, und die in Bild 1 dargestellte Funktion kann einfach aus Geraden unterschiedlicher Steigung zusammengesetzt werden. Die Hinterlegung dieser Kennlinie in der Umrichtersteuerung eines entsprechend ausgestatteten Umrichters oder einem separaten Schutzgerät ist technisch ohne grossen Aufwand realisierbar.

Gründe für die drehzahlvariable Strombegrenzung

Die frequenzabhängige Strombegrenzung ist notwendig, da bei den hier betrachteten, eigenbelüfteten Maschinen der thermische Widerstand zwischen Maschinengehäuse und Umgebung stark von der an der Maschinenoberfläche herrschenden Strömungsgeschwindigkeit der Luft und somit von der Lüfterdrehzahl abhängt. Diese Abhängigkeit kann experimentell z.B. durch Messung der Gehäusetemperatur bei verschiedenen Lüfterdrehzahlen und bekannter, in der Maschine umgesetzter Verlustleistung global betrachtet aus dem Quotienten aus Übertemperatur und Verlustleistung berechnet werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurden dazu die Maschinen mit Gleichstrom im Stator geheizt und der Maschinenlüfter über eine zweite Maschine angetrieben. Zur Vermeidung unerwünschter Wirbelstromverluste im Rotor wurde das Blechpaket von der Rotorwelle entfernt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2 dargestellt.

Das Ergebnis der Messung ist für jeweils eine Maschine der Baugrösse 132 und 180 in Bild 3 ausgewertet worden. Dabei wird deutlich, dass sich die Kurven für hohe Drehzahlen einem Sättigungswert nähern und dass bei kleinen Drehzahlen ab etwa 750 min^{-1} ein starker Anstieg des thermischen Widerstands zu verzeichnen ist. Dies ist auch der Grund für den Beginn der Belastungsverminderung bei den hier untersuchten Maschinen gemäss Bild 1.

Die Verläufe des Wärmeübergangswiderstands zur Umgebung in Abhängigkeit der Drehzahl lassen sich für beide Maschinenbaugrössen als Polynom siebter Ordnung approximieren, siehe Bild 3.

Die drehzahlvariable Strombegrenzung soll nun sicherstellen, dass aufgrund der bei kleineren Drehzahlen schlechter werdenden Kühlung die Belastung und somit die Grundschwingungsverluste der Maschine reduziert werden, um eine unzulässige Erwärmung zu vermeiden. Die Oberschwingungsverluste machen nach [2] nur etwa 10% der Grundschwingungsverluste bei Bemessungsbetrieb aus und können daher hier vernachlässigt werden.

Die auch in der EG-Baumusterprüfbescheinigung dargestellte Kurve (Bild 1) der drehzahlabhängigen Strombegrenzung ist eine stark vereinfachte Berücksichtigung des drehzahlabhängigen Wärmeübergangswiderstands der Maschine zur Umgebung gemäss Bild 3. Würde man den Kehrwert $\frac{1}{P_V}$ der gesamten in der Maschine umgesetzten Verlustleis-

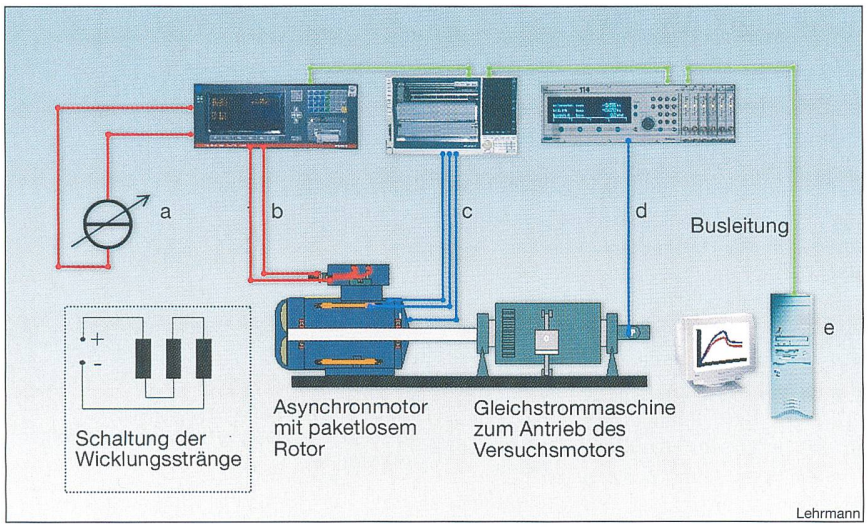


Bild 2 Versuchsaufbau zur Ermittlung des thermischen Widerstands Gehäuse–Umgebung

Die Messung wurde an zwei Versuchsmaschinen der Baugrössen 132 und 180 durchgeführt.

a Stellbare Gleichstromquelle zur Heizung der Maschine
b Messung der elektrischen Heizleistung
c Messung von Gehäuse- und Wickeltemperatur
d Messung der Antriebsdrehzahl
e Berechnung des Wärmeübergangswiderstands der Asynchronmaschine in Abhängigkeit der Drehzahl

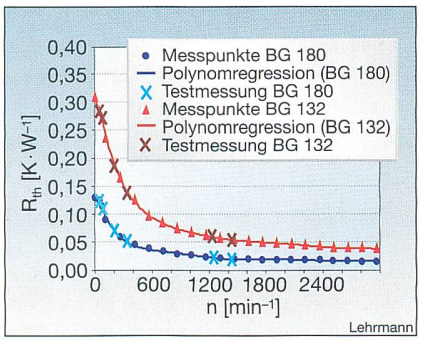


Bild 3 Drehzahlabhängiger Verlauf des thermischen Widerstands Gehäuse–Umgebung

Maschinen der Baugrössen 132 und 180; BG: Baugrösse

tung über die Drehzahl gemäss Bild 3 variieren, so würde sich die Gehäusetemperatur an einer festgelegten Messstelle nicht verändern.

Verbesserung der Maschinenausnutzung

Die vereinfachte Berücksichtigung des thermischen Widerstands zwischen Maschinenoberfläche und Umgebung über die in Bild 1 dargestellte Kennlinie führt gerade bei kleinen Drehzahlen zu einer ziemlich schlechten Ausnutzung der Maschine, da in der Realität der thermische Widerstand zur Umgebung deutlich langsamer ansteigt als über die Gerade im linken Teil der Funktion nachgebildet.

Eine Optimierung der Maschinenausnutzung ist möglich, wenn anstelle der Strombegrenzung nach Bild 1 der zulässige Betriebsstrom des Motors und somit die Verlustleistung in Echtzeit berechnet werden und in die Berechnung auch Parameter wie die Belastungshistorie des Motors sowie die Umgebungstemperatur am Aufstellungsort einfliessen. Durch eine Einbeziehung der Belastungshistorie sind bei in Teillast betriebener bzw. kalter Maschine deutlich längere Überlastungszeiten zulässig, da ohne deren Berücksichtigung immer vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden muss (40 °C Kühlmitteltemperatur und eine dem Betrieb mit Bemessungslast entsprechende Dauerbetriebserwärmung bei Eintritt der Überlast). Bei Berücksichtigung der Historie des Antriebs im Maschinenschutzkonzept können z.B. bei Rührerantrieben unnötige Abschaltungen vermieden werden, wenn das Füllgut zu Beginn der Mischvorgangs eine erhöhte Viskosität aufweist, die sich z.B. nach Zugabe weiterer Komponenten nach einiger Zeit wieder normalisiert.

Der zentrale Punkt dieser Betrachtungen ist das thermische Ersatzschaltbild der Maschine, auf welches im Folgenden näher eingegangen wird.

Das thermische Maschinen-Ersatzschaltbild

Die thermischen Ersatzschaltbilder elektrischer Maschinen waren in der Vergangenheit bereits Gegenstand einiger wissenschaftlicher Arbeiten. Hier sei besonders auf [3, 4] verwiesen.

Bei den in der PTB[1)] durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass mit einem einfachen Ersatzschaltbild, das die Teile Gehäuse, Statorblechpaket, Statorwicklung und Rotor jeweils als einen Körper abbildet, eine ausreichende Genauigkeit bei der Temperaturvorausberechnung erreicht werden kann [2]. Die inneren Wärmeübergangswiderstände der Maschine wurden über den betrachteten Drehzahlbereich als konstant angenommen. Durch Messungen wurde die Zulässigkeit dieser Annahme verifiziert.

Die Werte der Ersatzschaltbildelemente können durch Versuche oder bei den Wärmekapazitäten auch über das Gewicht und die spezifische Wärmekapazität der verarbeiteten Materialien bestimmt werden. Die Alternative dazu ist eine Ermittlung der Wärmekapazitäten durch Bestimmung der thermischen Zeitkonstanten analog zur Zeitkonstante eines elektrischen R-C-Gliedes.

Die Wärmeübergangswiderstände ergeben sich aus den Temperaturen des Statorgehäuses, der Statorwicklung, des Statorblechpakets und des Rotors sowie den in diesen Teilen umgesetzten Verlustleistungen. Hierzu muss jedoch der thermische Beharrungszustand des Motors erreicht worden sein. Zur Vereinfachung werden hier Statorwicklung, Statorblechpaket und Rotor jeweils als ein Körper aufgefasst und eine mittlere Temperatur angegeben. Für das Statoreisen werden dabei die Eisenverluste, die sich in der Realität aus den Jochverlusten und Zahnverlusten zusammensetzen, als eine Verlustquelle betrachtet. Die Zusatzverluste

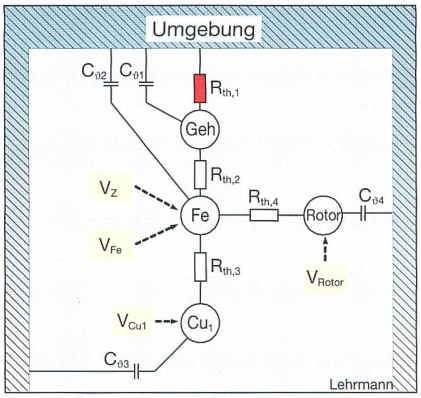


Bild 4 Thermisches Maschinen-Ersatzschaltbild

$R_{th,1}$ Thermischer Widerstand Gehäuse–Umgebung
$R_{th,2}$ Thermischer Widerstand Statorblechpaket–Gehäuse
$R_{th,3}$ Thermischer Widerstand Statorwicklung–Statorblechpaket
$R_{th,4}$ Thermischer Widerstand Rotor–Statorblechpaket
$C_{\vartheta 1}$ Wärmekapazität Gehäuse
$C_{\vartheta 2}$ Wärmekapazität Statorblechpaket
$C_{\vartheta 3}$ Wärmekapazität Statorwicklung
$C_{\vartheta 4}$ Wärmekapazität Rotor
Geh Gehäuse
V_Z Zusatzverluste der Maschine
V_{Cu1} Kupferverluste
V_{Fe} Eisenverluste
V_{Rotor} Rotorverluste

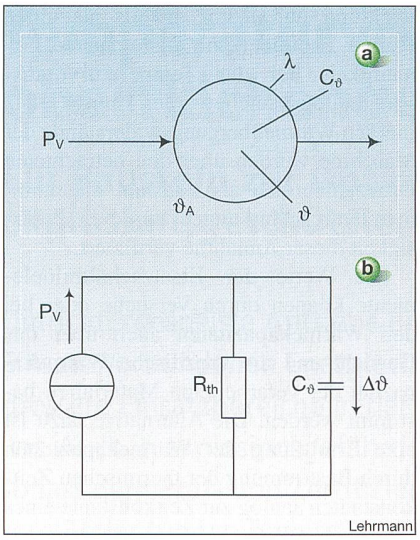


Bild 5 Ein-Körper-Modell und zugehöriges Ersatzschaltbild

Bild 5a: Ein-Körper-Modell; Bild 5b: Thermisches Ersatzschaltbild

ϑ Temperatur
$\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz
ϑ_A Umgebungstemperatur
λ Wärmeleitwert zur Umgebung
C_ϑ Wärmekapazität
P_V Verlustleistung
R_{th} Thermischer Widerstand

der Maschine wurden ebenfalls dem Statoreisen zugerechnet.

Dem Rotor werden bei den Betrachtungen die im Käfig umgesetzten Stromwärmeverluste sowie die Reibungsverluste der Maschine zugeordnet.

Bei den hier durchgeführten, vereinfachten Betrachtungen wird die Wärmeableitung über das Maschinenfundament vernachlässigt und die Welle als thermisch ideal isolierend angesehen. Diese Annahme ist dann nicht mehr zulässig, wenn sich von der Arbeitsmaschine ein Wärmefluss Richtung Motor ergibt, z.B. bei einer Pumpe für heisse Flüssigkeiten.

Bei den an den Versuchsmaschinen durchgeführten Untersuchungen wurde zunächst der drehzahlabhängige Wärmeübergangswiderstand zur Umgebung gemäss Bild 2 bestimmt (in Bild 4 rot dargestellt). Danach folgten dann die nicht drehzahlabhängigen inneren Wärmeübergangswiderstände durch Auswertung von Erwärmungsmessungen. Die Wärmeübergangswiderstände ergeben sich dabei aus den Temperaturdifferenzen zum jeweils benachbarten Maschinenteil, über das die im untersuchten Teil erzeugte thermische Verlustleistung abfliesst.

Für die Berechnung der Wärmekapazitäten wurde jedes Maschinenteil dann als Körper homogener Wärmekapazität und Temperatur aufgefasst. Die Wärmekapazitäten sind zur Berechnung der Dauerbetriebsübertemperatur ϑ_∞ unbedeutend und werden nur zur Berechnung der Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge benötigt.

Im Folgenden soll der Ansatz zur Berechnung des thermischen Widerstands und der Wärmekapazität für einen homogenen Körper hergeleitet werden:

Für den Wärmeleitwert zur Umgebung kann geschrieben werden:

$$\lambda = \frac{1}{\Delta\vartheta_\infty} \cdot P_V \qquad (1)$$

Der thermische Widerstand ergibt sich somit zu

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{P_V} \cdot \Delta\vartheta_\infty \qquad (2)$$

Für das angenommene Einkörper-Modell ergibt sich für die Wärmekapazität der in Bild 5 dargestellte Zusammenhang.

Hieraus ergibt sich die Differenzialgleichung:

$$P_V\, dt = \lambda \cdot (\vartheta - \vartheta_A)dt + C_\vartheta\, d\vartheta \qquad (3)$$

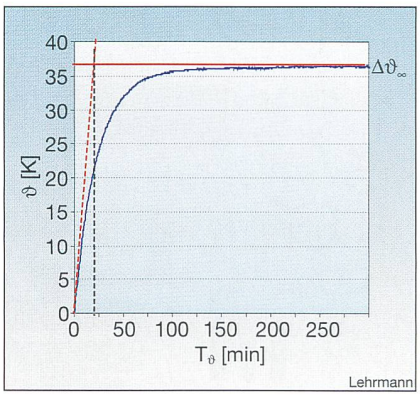


Bild 6 Grafische Bestimmung der thermischen Zeitkonstante eines Maschinenteils über die Tangentenmethode

$$\frac{P_V}{\lambda} = (\vartheta - \vartheta_A) + \frac{C_\vartheta}{\lambda}\frac{d\vartheta}{dt} \qquad (4)$$

Vereinfacht mit der Umgebungstemperatur ϑ_A = konstant folgt hieraus die Differenzialgleichung:

$$\frac{1}{\lambda} \cdot P_V(t) = \Delta\vartheta(t) + T_\vartheta \cdot \frac{d(\Delta\vartheta(t))}{dt} \qquad (5)$$

Aus der Formel 5 folgt dann gemäss [5]:

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_\infty \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_\vartheta}}) \qquad (6)$$

mit dem Endwert:

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{1}{\lambda} \cdot P_{V0} \qquad (7)$$

Aus dem in Bild 6 dargestellten Temperaturverlauf lässt sich grafisch die Temperaturzeitkonstante T_ϑ ermitteln.

Mithilfe der Temperaturzeitkonstanten T_ϑ und dem thermischen Widerstand R_{th} kann aus der Analogie zum elektrischen System und der Beziehung

$$T = R \cdot C \qquad (8)$$

die Wärmekapazität mit

$$C_\vartheta = \frac{T_\vartheta}{R_{th}} = T_\vartheta \cdot \lambda \qquad (9)$$

experimentell bestimmt werden [5].

Auf die elektrische Maschine bezogen, muss dieser Ansatz für jedes Maschinenteil durchgeführt werden, das bei der thermischen Analyse als ein Körper aufgefasst wird.

In der Praxis ist dieser Ansatz für den Maschinenhersteller ziemlich kompliziert und zeitaufwendig. Ein für den Hersteller praktikabler Alternativansatz ist die Bestimmung der Wärmekapazitäten über die Massen der verwendeten Materialien zusammen mit deren spezifischen Wärmekapazitäten, wobei diese Daten direkt den Produktionsunterlagen entnommen

Bauteil	*Material*	*Gewicht* *[kg]*	*Spezifische Wärmekapazität* *[J·K⁻¹·g⁻¹]*	*Wärmekapazität* *[J·K⁻¹]*
Statorwicklung	Cu	3,74	0,385	1439,90
Läufer (ohne Welle)	Al	8,93	0,897	8010,21
Läuferwelle	Fe	3,4	0,449	1526,60
Statorblechpaket	Fe	17,6	0,449	7902,40
Statorgehäuse (ohne Klemmkasten und Lagerschilde)	Fe (Gusseisen)	3,4	0,532	1808,80
Lagerschild (A-Lager)	Fe (Gusseisen)	3,2	0,532	1702,40
Lagerschild (B-Lager)	Fe (Gusseisen)	2,5	0,532	1330,00
A-Lager	Fe	0,366	0,449	164,33
B-Lager	Fe	0,288	0,449	129,31
			Summe	**24013,95**

Tabelle I Wärmekapazitäten der Versuchsmaschinen

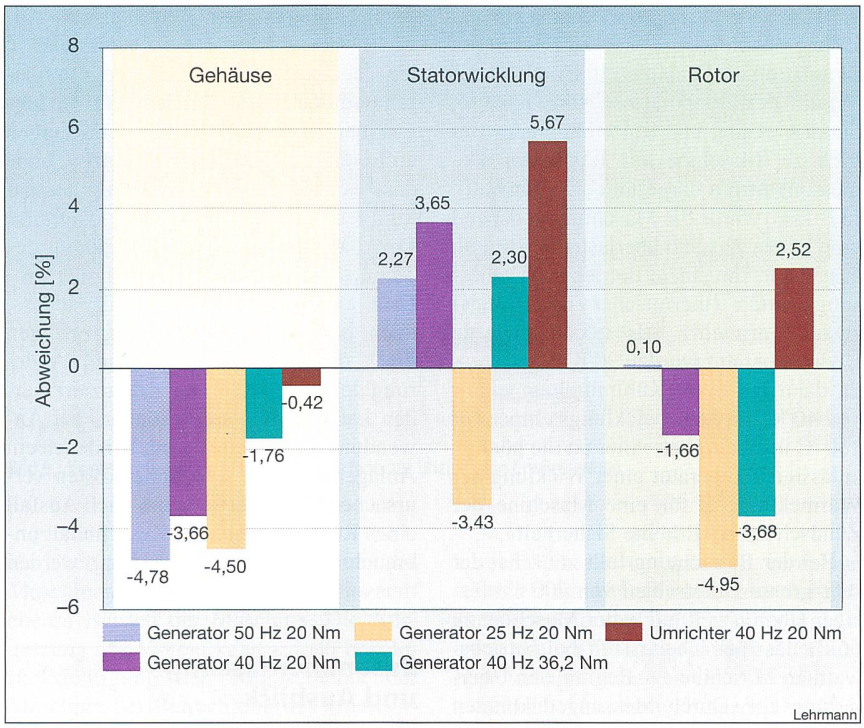


Bild 7 Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen

werden können. Der Vergleich der über beide Methoden bestimmten Wärmekapazitäten lieferte erwartungsgemäss eine recht gute Übereinstimmung. Für die hier betrachtete Maschine der Baugrösse 132 wurden mittels der «Massenmethode» die Wärmekapazitäten gemäss Tabelle I [2] ermittelt.

Zur Bestimmung der inneren Wärmeübergangswiderstände der Versuchsmaschine wurden Temperaturmessungen bei Netzbetrieb (50 Hz) an den einzelnen Elementen des Ersatzschaltbilds durchgeführt. Über die bekannten Verlustleistungen für jedes Maschinenteil ergaben sich dann, wie bereits beschrieben, die thermischen Widerstände zwischen den Elementen des Ersatzschaltbilds. Als kompliziert erwies sich dabei die Bestimmung der Blechpakettemperatur. Ein Anbohren des Statorblechpakets verbot sich, da die dabei unweigerlich entstehenden Blechschlüsse die Verluste und somit die Temperatur in der Umgebung der Messstelle ansteigen lassen würden.

Die Realisierung erfolgte daher über ein Kupferblättchen mit aufgelötetem Thermoelement, welches in eine Statornut eingeschoben wurde.

Die Berechnung der Statorkupferverluste erfolgte über den Wicklungswiderstand und den Statorstrom, die im Statorblechpaket umgesetzten Verluste wurden der Summe der Eisen- und der Zusatzverluste gleichgesetzt, und die gesamten Rotorverluste ergaben sich aus den Reibungsverlusten zuzüglich der über den Maschinenschlupf berechneten Rotorverluste. In Tabelle II sind die für die Maschine der Baugrösse 132 zur Berechnung der Wärmeübergangswiderstände ermittelten Verlustleistungen dargestellt.

Dieses zur Anwendbarkeit mit vertretbarem Aufwand bewusst einfach gehaltene Verfahren ist natürlich mit einigen Ungenauigkeiten verbunden. Bei der späteren Anwendung zeigte sich jedoch, dass die Genauigkeit der Temperaturvorausberechnung für den Maschinenschutz ausreichend ist. So wurden beim Betrieb der Maschine am Frequenzumrichter z.B. Stromverdrängungseinflüsse nicht berücksichtigt. Gemäss Bild 7 bleiben aber auch hier die Abweichungen zum Messwert kleiner als 6%.

In den Tabellen II und III sind als Beispiel die zur Bestimmung der Ersatzschaltbildelemente bei einer Maschine der Baugrösse 132 ermittelten Werte bzw. der Berechnungszusammenhang enthalten.

Wärmeübergangswiderstand	*Berechnung [K·W⁻¹]*	*Wert [K·W⁻¹]*
Gehäuse–Umgebung	$R_{th,1} = \frac{\vartheta_{Geh}}{P_{V,ges}} = \frac{45,3}{1073,5}$	0,0421984163
Statorblechpaket–Gehäuse	$R_{th,2} = \frac{\vartheta_{Bl} - \vartheta_{Geh}}{P_{V,ges}} = \frac{12,9}{1073,5}$	0,0120167676
Wicklung–Statorblechpaket	$R_{th,3} = \frac{\vartheta_{Wick} - \vartheta_{Bl}}{P_{V,Cu1}} = \frac{24,3}{409,1}$	0,0593986800
Rotor–Statorblechpaket	$R_{th,4} = \frac{\vartheta_{Rot} - \vartheta_{Bl}}{P_{V,Rot}} = \frac{50}{445,1}$	0,112334307

Tabelle II Berechnungsbeispiel für die Wärmeübergangswiderstände
Betrieb bei 50 Hz und 36,2 Nm Belastungsdrehmoment

Berechnung der Dauerbetriebserwärmungen (stationärer Betriebsfall)

Für die Dauerbetriebserwärmung (Temperaturen im thermischen Beharrungszustand) müssen nur die thermischen Widerstände berücksichtigt werden. Die Wärmekapazitäten haben keine Bedeutung, da sich gemäss Definition im thermischen Beharrungszustand die enthaltene Wärmemenge und die Temperatur nicht mehr ändern ($\frac{d\vartheta}{dt} = 0$).

In Tabelle IV ist das Ergebnis dieser Vorausberechnung für verschiedene Frequenzen dargestellt. Es zeigte sich, dass die berechneten Werte gut mit den während des Versuchs gemessenen Temperaturen übereinstimmen. Die beobachteten Abweichungen lagen durchweg unter 6%, bezogen auf den Messwert, und werden somit mit einer unter Explosionsschutzgesichtspunkten akzeptablen Genauigkeit vorausberechnet.

Transiente Vorgänge

Wenn sich ausgehend von einem thermischen Beharrungszustand die in der Maschine umgesetzte Verlustleistung ändert, dann nähert sich die Temperatur der jeweiligen Maschinenteile gemäss Formel 6 dem neuen Endwert an.

Zur Simulation des transienten Erwärmungsverhaltens wurde das gemäss Bild 4 dargestellte thermische Ersatzschaltbild mit Multisim, einer Software zur Berechnung elektrischer Netzwerke, als elektrische Schaltung abgebildet. Thermische Widerstände wurden über elektrische Widerstände, Wärmekapazitäten über Kondensatoren nachgebildet. Die Spannung an den Kondensatoren ent-

Bezeichnung	Formel	Berechnung
Statorkupferverluste	$P_{V,Cu1}$	$3 \cdot R_{1,DC} \cdot I_1^2$
Statoreisenverluste	P_{Fe}	Leerlaufversuch
Zusatzverluste	P_Z	$\frac{P_1}{100} \cdot 0{,}5$
Rotorverluste	$P_{V,Rot}$	$P_1 - P_{V,Cu1} - P_{Fe} - P_Z - P_2$

Tabelle III Aufteilung der gesamten Maschinenverluste

spricht dabei der Übertemperatur gegenüber der Umgebung.

Unter den Gesichtspunkten des Explosionsschutzes ist hierbei vor allem der Überlastfall relevant, wobei die Maschine vor dem Überschreiten der zulässigen Temperatur durch ein Maschinenteil abgeschaltet werden muss. Hierbei hat die Maschinentemperatur beim Eintreten des Überlastfalles einen entscheidenden Einfluss auf die maximal zulässige Überlastzeit. Im thermischen Modell wurde dabei eine bestehende Übertemperatur zu Beginn der Überlastung über eine Anfangsladung der Kondensatoren zu Beginn der Simulation nachgebildet. In Bild 8 ist der Verlauf der Temperaturen von Gehäuse, Statorwicklung und Rotor bei einem Betrieb der Maschine mit 1,5-fachem Bemessungsstrom dargestellt (Überlastfall). In Bild 8a wurde die Maschine ausgehend vom kalten Zustand überlastet, in Bild 8b ausgehend von einem Betrieb mit Bemessungswerten (thermischer Beharrungszustand erreicht). Als höchstzulässige Übertemperatur wurden 90 K zugelassen, da dann bei einer Kühlmitteltemperatur von 40 °C die Statorwicklungstemperatur 130 °C überschreitet – dies ist die höchstzulässige Temperatur einer Wicklung der Wärmeklasse F für eine Maschine der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit».

Bei der Betrachtung fällt zunächst der sehr grosse Unterschied von 700 s zulässiger Überlastzeit bei kalter Maschine zu 66 s zulässiger Überlastzeit bei betriebswarmer Maschine zu Beginn der Überlastung auf. Durch Messungen konnten die hier berechneten Zeiten verifiziert werden. Der Vergleich der Bilder 8a und 8b zeigt sehr deutlich das Potenzial bezüglich der Ausnutzung der Maschine, das in der Berücksichtigung der Historie der Maschine im Schutzkonzept steckt. Interessant wird eine solche Betrachtung besonders dann, wenn der Antrieb anwendungsbedingt kurzzeitigen Überlastungen ausgesetzt sein kann, wie etwa bei Antrieben in Fördersystemen.

Last [Nm]	Frequenz [Hz]	Maschinenteil	Verlustleistung [W]	Temperatur gerechnet [K]	Temperatur gemessen [K]
Betrieb am Generator					
20	50	Gehäuse	519,4	21,9	23
20	50	Statorblechpaket	519,4	28,14	—
20	50	Statorwicklung	135,5	36,1	35,3
20	50	Rotor	184,37	48,9	48,85
20	40	Gehäuse	435,4	20,52	21,3
20	40	Statorblechpaket	435,4	27,06	—
20	40	Statorwicklung	132,5	34,93	33,7
20	40	Rotor	145,22	43,37	44,1
20	25	Gehäuse	322,9	21,01	22
20	25	Statorblechpaket	322,9	24,89	—
20	25	Statorwicklung	130,6	32,64	33,8
20	25	Rotor	105,0	36,69	38,6
36,2	40	Gehäuse	981,3	51,28	52,2
36,2	40	Statorblechpaket	981,3	63,07	—
36,2	40	Statorwicklung	422,7	88,18	86,2
36,2	40	Rotor	389,42	106,82	110,9
Betrieb am Umrichter 1*)					
20	40	Gehäuse	499,0	23,5	23,6
20	40	Statorblechpaket	499,0	29,49	—
20	40	Statorwicklung	132,5	37,3	35,3
20	40	Rotor	177,04	49,3	48,09

Tabelle IV Berechnung der Maschinentemperaturen bei verschiedenen Lastzuständen und Vergleich mit den gemessenen Temperaturen

*) bei U_E = 500 V, F_s = 4 kHz, $P_{V,OS}$ = 63,63 W

Praktische Anwendbarkeit

Für die Anwendung des hier beschriebenen Ansatzes ist es erforderlich, die Wärmekapazitäten der einzelnen Maschinenteile, die inneren Wärmeübergangswiderstände und den drehzahlabhängigen thermischen Widerstand zur Umgebung zu bestimmen.

Diese Untersuchungen müsste der Motorhersteller durchführen, wobei die Wärmekapazitäten gemäss Tabelle I mit hinreichender Genauigkeit über die für die einzelnen Maschinenteile verwendeten Materialmengen und deren spezifische Wärmekapazitäten ermittelt werden können.

Die thermischen Widerstände können gemäss den hier beschriebenen Verfahren recht einfach und mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden. Der Wärmeübergangswiderstand zur Umgebung muss dabei für jede Gehäuse- und Lüfterbauform nur einmal bestimmt werden, die inneren thermischen Widerstände für jeden Maschinentyp.

Die so ermittelten Daten kann der Motorhersteller in seiner Dokumentation veröffentlichen. Der Betreiber des Antriebssystems kann diese Daten dann in ein geeignetes Schutzgerät programmieren und den Motor gerade in Anwendungen, bei denen kurzzeitige Überlastungen auftreten, deutlich höher ausnutzen, ohne dass es zu einer Überschreitung der zulässigen Temperaturklassen kommt. Denkbar wäre auch eine Anbindung des Schutzsystems mittels Ethernet oder Profibus an die Prozessleittechnik, sodass, noch bevor eine Abschaltung erfolgen muss, die Motorlast – z.B. durch Änderung der Prozessführung – reduziert werden kann. Dies wäre besonders bei Anwendungsfällen interessant, bei denen ein Anlagenstillstand sehr hohe Kosten verursachen würde, etwa wenn nach Ausfall eines Rührerantriebs der Kesselinhalt unbrauchbar wird und teuer entsorgt werden muss.

Zusammenfassung und Ausblick

Die zur einfachen Anwendbarkeit des neuen Zulassungskonzepts getroffenen Vereinfachungen bezüglich der maxima-

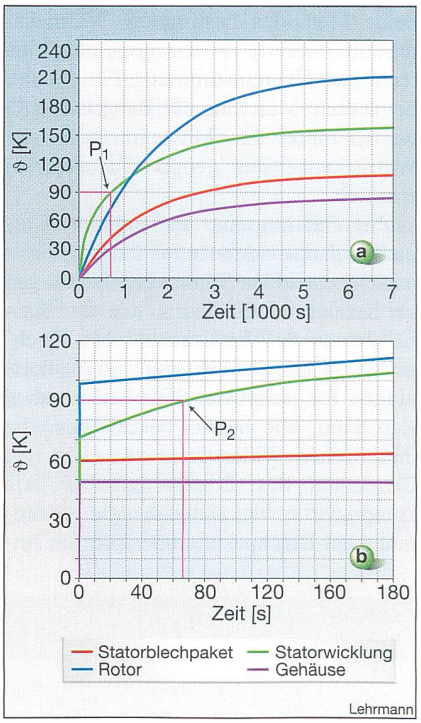


Bild 8 Temperaturverlauf der Maschine mit 1,5-fachem Bemessungsstrom

Bild 8a: Betrieb der «kalten» Maschine; Bild 8b: Baugrösse: 132; die Maschine befindet sich vor der Überlast im thermischen Beharrungszustand

P_1 Die Auslösetemperatur des Kaltleiters von 130 °C wird nach etwa 700 s erreicht (entspricht einer Übertemperatur von 90 K bei 40 °C Kühlmitteltemperatur)

P_2 Die Auslösetemperatur des Kaltleiters von 130 °C wird nach etwa 66 s erreicht (entspricht einer Übertemperatur von 90 K bei 40 °C Kühlmitteltemperatur)

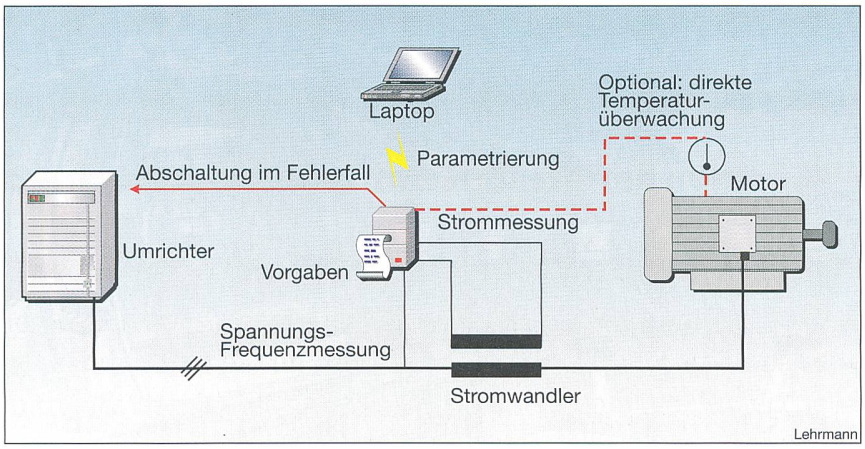


Bild 9 Konzept zur Überwachung der Maschine auf unzulässige Erwärmungen

len Überlastzeit und der Reduzierung des Maschinenstroms gewährleisten einen sicheren Betrieb der Maschine. Die Ausnutzung des Motors kann jedoch bei Berücksichtigung der Vorgeschichte der Maschine bei Betrachtung des Überlastfalls deutlich verbessert werden, ohne den sicheren Betrieb zu gefährden, siehe Bild 8.

Bei der Anwendung des neuen Zulassungskonzepts zeigte sich in der Praxis, dass die Maschine gerade im unteren Drehzahlbereich bei linearer Strombegrenzung thermisch bei Weitem nicht ausgenutzt ist, eine höhere Belastung also ohne Gefahr unzulässiger Temperaturen möglich ist. Wird anstelle der linearen Reduzierung unterhalb der Frequenz 25 Hz der Strom mit dem Verlauf des thermischen Widerstands Gehäuse–Umgebung reduziert, kann die Maschinenausnutzung bei kleinen Frequenzen signifikant verbessert werden. Hohe Kosten verursachende und den Wirkungsgrad der Maschine reduzierende Überdimensionierungen können somit vermieden werden.

Zur Anwendung des hier beschriebenen Verfahrens ist es erforderlich, dass der Motorhersteller die benötigten Daten für jeden Motortyp (Wärmeübergangswiderstände, Wärmekapazitäten) ermittelt und an den späteren Betreiber des Antriebssystems weitergibt.

Des Weiteren ist zur Umsetzung erforderlich, dass der Anlagenbetreiber entweder einen Frequenzumrichter mit der nötigen Überwachungsfunktionalität einsetzen oder – wie in Bild 9 dargestellt – eine externe Überwachungseinrichtung einsetzen muss.

Dabei ist auch denkbar, zur Verbesserung der Maschinenausnutzung – an den Einsatzort der Maschine angepasst – nur einzelne Komponenten zu realisieren. Bei einem Antrieb, wo betriebsmässig mit kurzen Überlastungsphasen gerechnet werden muss, kann die Maschinenausnutzung schon durch Berücksichtigung der tatsächlichen Wärmekapazitäten und der Historie signifikant gesteigert werden.

Soll die Ausnutzung hingegen bei kleinen Drehzahlen verbessert werden, kann dies schon allein durch Berücksichtigung des tatsächlichen Wärmeübergangswiderstands zur Umgebung erreicht werden.

Interessant ist dieses Verfahren vor allem bei grösseren Antrieben, wo eine Überdimensionierung mit hohen Kosten bei der Anschaffung erkauft werden muss, und in Anwendungsfällen, bei denen eine überraschende Abschaltung des Antriebs zu hohen Folgekosten durch längeren Produktionsausfall führen kann.

In weitergehenden Untersuchungen soll die Anwendbarkeit dieses Verfahrens an verschiedenen Maschinentypen erprobt und zusammen mit einem Industriepartner ein geeignetes, externes Schutzgerät entwickelt werden. Dabei soll auch untersucht werden, inwieweit Verfahren zur Online-Parameteridentifikation [6] (Bestimmung der Maschinentemperatur über das elektrische Verhalten) praktisch anwendbar sind.

Referenzen

[1] C. Lehrmann: Ex-geschützt: Antriebe mit Frequenzumrichter, Vorschlag für ein neues Zulassungskonzept. Bulletin SEV/VSE, Heft 24/25 2004, S. 17–23.

[2] C. Lehrmann: Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichtergespeiste Käfigläufer der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit». Dissertation Leibniz-Universität Hannover, Shaker-Verlag Aachen, 2006.

[3] W. Riexinger: Beitrag zur Berechnung der Übertemperaturen bei oberflächengekühlten, berippten Drehstrommotoren kleiner Baugrössen. Dissertation Universität Stuttgart, 1969.

[4] J. Hak: Wärmequellen-Netze elektrischer Maschinen. E und M, Jahrgang 76, Heft 11, S. 236–243.

[5] D. Schröder: Elektrische Antriebe – Grundlagen. Springer-Verlag Berlin, 2000.

[6] J. Kertzscher: Ein Verfahren zur Identifikation der elektrischen Parameter von Asynchronmaschinen. Tenea-Verlag Berlin, 2003.

Weiterführende Literatur

G. Bergan: Untersuchung der Belüftung von oberflächenbelüfteten geschlossenen Asynchronmotoren. Diplomarbeit der Technischen Hochschule Stuttgart, Institut für Elektrische Maschinen, Sommersemester 1966.

T. Vetter: Überwachung und Prädiktion des Erwärmungsverhaltens einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer mittels Parameterschätzung. Dissertation der Technischen Hochschule Darmstadt, 1988.

PTB – Prüfregel: Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart «Erhöhte Sicherheit». Ex e, 1969.

Angaben zum Autor

Dr.-Ing. **Christian Lehrmann** arbeitet im Laboratorium für Explosionsgeschützte Antriebssysteme der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig.
christian.lehrmann@ptb.de

[1] PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Sie ist das deutsche Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben.

Résumé

Calcul préalable de température sur les moteurs asynchrones refroidis par la surface

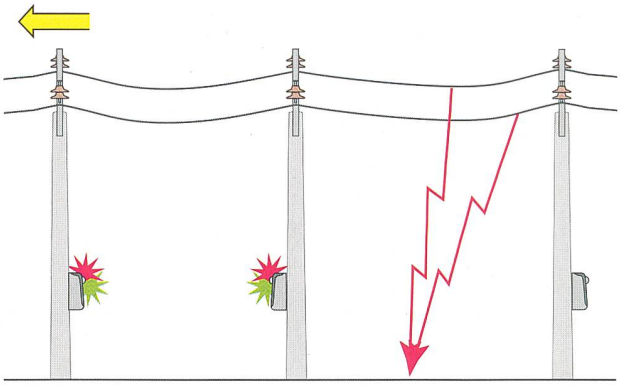
Un élément d'optimisation du nouveau concept d'homologation pour machines asynchrones à protection antidéflagrante alimentées par onduleur. Etant donné les potentiels d'économie d'énergie qu'ils offrent, les moteurs alimentés par onduleur sont employés dans de plus en plus d'applications pratiques industrielles. Ils sont également de plus en plus nombreux dans les zones présentant un danger d'explosion, ce qui fait que le travail d'essai et de certification gagne en importance. Au niveau de l'exécution mécanique, les moteurs à sécurité intrinsèque «sécurité accrue» sont généralement nettement moins chers à construire que les moteurs à protection en «enveloppe antidéflagrante». Le travail d'essai était autrefois beaucoup plus important que pour une «enveloppe antidéflagrante» étant donné que le moteur et l'onduleur ne pouvaient être testés qu'en combinaison et que les possibilités d'adaptation par l'utilisateur étaient fortement limitées. En cas de réparation, on ne pouvait remplacer le moteur et l'onduleur que par des modèles du même type, autrement le système d'entraînement devait faire l'objet d'un nouvel essai.

«Easergy» Merlin Gerin – Gerichtete Fehlerstromanzeigegeräte für Trafostationen und Freileitungen

Die gerichteten Fehlerstromanzeigegeräte Easergy Flair und Flite sind für unterirdische und Freileitungs-MS-Netze mit kompensiertem, isoliertem oder impedantem Neutralleiter konzipiert. Mit der Leuchtanzeige lässt sich der Fehler lokalisieren.

- Erfassen von gerichteten Erdschlüssen
- Erfassen von Fehlern Phase-Phase
- Signalkontakt für RTU

Easergy Flair und Flite
– Dreiphasiges, gerichtetes Fehlerstromanzeigegeräte



Fehlerstromanzeigegeräte Easergy verbessern die Qualität von MS-Netzen hauptsächlich durch den verminderten Zeitaufwand für das Lokalisieren von Fehlern

Merlin Gerin · Telemecanique · BERGER LAHR · SAREL

Schneider Electric (Schweiz) AG, 3063 Ittigen, Tel. 031 917 33 33, www.schneider-electric.ch

Schneider Electric
Building a New Electric World