Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 95 (2004)
Heft: 24-25

Artikel: Ex-geschützt : Antriebe mit Frequenzumrichter
Autor: Lehrmann, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-858021

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: 16.07.2025

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

Ex-geschützt: Antriebe mit Frequenzumrichter

Vorschlag für ein neues Zulassungskonzept

Zurzeit wird bei der Zulassung eines Motors der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» der Motor über das Zertifikat an den Frequenzumrichter gekoppelt. Wer eine Komponente später einmal austauschen will, muss mit einer aufwändigen Neuzertifizierung rechnen. Das vorgeschlagene Zulassungskonzept berücksichtigt die zusätzlichen Verluste beim Betrieb am Frequenzumrichter und zeigt, wie die Erwärmung abgeschätzt werden kann. So kann ein Motor sicher an einem Frequenzumrichter betrieben werden, ohne dass diese als Einheit getestet werden müssen.

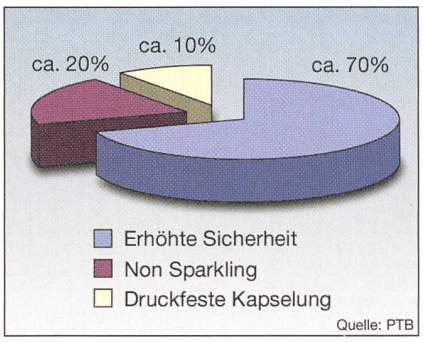

Bild 1 Verteilung der Zündschutzarten bei Motoren in der chemischen Industrie Deutschlands (Schätzung)

Christian Lehrmann

Umrichtergespeiste Antriebe werden in der Industrie immer beliebter. Besonders beim Antrieb von Strömungsmaschinen sparen sie Energie, und die Förderleistung lässt sich besser dosieren. Ausserdem werden sowohl die Maschine als auch das Produkt geschont. Künftig wird daher der Anteil umrichtergespeister Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen stetig zunehmen.

Bei den netzgespeisten Antrieben ist die Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» klar dominant. Diese Zündschutzart lässt sich einfach und kostengünstig realisieren. Bei der Zündschutzart «Druckfeste Kapselung» liegen die Fertigungskosten deutlich höher, denn hier müssen sehr kleine Fertigungstoleranzen eingehalten werden, um einen zünddurchschlagsicheren Spalt herzustellen.

Der Prüfungsaufwand des heute praktizierten Zulassungskonzepts ist aber für einen umrichtergespeisten Antrieb der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» deutlich grösser als bei einer Ausführung in der Zündschutzart «Druckfeste Kapselung». Bei der «Druckfesten Kapselung» bedeutet eine Zündung im Inneren keine Gefahr, die Explosion wird gemäss Definition dieser Zündschutzart nicht auf die Umgebung übertragen. Bei der «Erhöhten Sicherheit» müssen Motor und Frequenzumrichter als eine Einheit geprüft werden. Dies wurde als erforderlich erachtet, da bei einer Maschine der Rotor unzulässige Temperaturen annehmen kann. Die Rotortemperatur kann jedoch während des Betriebes nur mit grossem, bei Kleinmaschinen nicht praktikablem Aufwand überwacht werden. Bei der Prüfung werden deshalb die erreichten Temperaturen gemessen und die zulässigen Einstellungen des Umrichters festgelegt. Die zulässigen Bereiche werden zusammen mit dem Maschinen- und Umrichtertyp im Zertifikat festgehalten.

Die Kopplung Motor-Umrichter sowie die strenge Vorgabe der zulässigen Betriebsparameter schränken den Betreiber des Antriebs relativ stark ein. Besonders der spätere Austausch einer Komponente kann ein grosses Problem darstellen: Wenn der im Zertifikat genannte Typ nicht mehr erhältlich ist, wird eine Neuzulassung erforderlich.

Bei der «Druckfesten Kapselung» wird der Motor hingegen pauschal für den Betrieb am Frequenzumrichter zugelassen, eine Festlegung des Umrichtertyps erfolgt nicht. Der spätere Austausch einer Komponente ist problemlos möglich [1].

Bild 1 zeigt die Aufteilung der Zündschutzarten der in der chemischen Industrie in Deutschland eingesetzten Induktionsmotoren (Schätzung). Werden nur die umrichtergespeisten Antriebe betrachtet, kehrt sich das Verhältnis zwi-

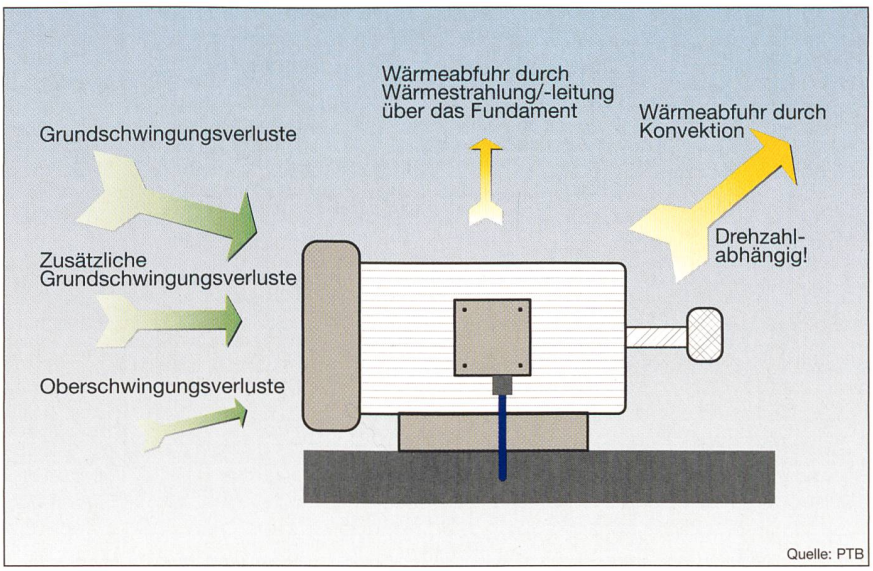

Bild 2 Thermisches Gleichgewicht an einer Induktionsmaschine

Stand des Zulassungskonzeptes

Das Zulassungskonzept ist ein Vorschlag, der zurzeit von den verschiedenen Gremien diskutiert wird. Die Versuche und Messungen unter Zulassungsbedingungen zeigen, dass sich das Konzept in der Praxis gut eignet.

schen der «Erhöhten Sicherheit» und der «Druckfesten Kapselung» um. Hieraus lässt sich ableiten, dass bei einer Vereinfachung des Zulassungsverfahrens bei der «Erhöhten Sicherheit» diese Zündschutzart auch bei umrichtergespeisten Motoren deutlich an Bedeutung gewinnen wird.

Gefahr einer Explosion minimieren

Explosionsgeschützte Maschinen sollen die Zündgefahren sowohl im Normalbetrieb als auch im Fehlerfall (Zone 1) auf ein vertretbares Mass reduzieren [2]. Das ist auch eine grundlegende Forderung der Richtlinie 94/9/EG. Eine Induktionsmaschine kann durch mechanisch erzeugte Funken, durch elektrische Entladungen sowie durch heisse Oberflächen zur Zündquelle werden. Die Temperatur eines Maschinenteils wird im stationären Fall durch die Wärmeerzeugung in diesem Teil sowie den Wärmeabfluss an die Umgebung bestimmt (Bild 2). Wird die Maschine durch einen Ventilator an der eigenen Welle gekühlt, ist die Kühlung von der Drehzahl abhängig, und bei kleinen Drehzahlen können bereits relativ geringe Verlustleistungen zu unzulässigen Temperaturen führen.

Die Grundschwingungsverluste treten sowohl beim Betrieb am Netz als auch bei einer Speisung durch den Frequenzumrichter auf. Diese Verluste setzen sich aus den Eisenverlusten, den ohmschen Verlusten in Stator und Rotor sowie den Lagerreibungsverlusten zusammen [3]. Fällt die Spannung am Motor unter den Bemessungswert ab, entstehen zusätzliche Verluste.

Beim Betrieb eines Motors am Frequenzumrichter treten gegenüber dem Betrieb am 50-Hz-Netz zusätzliche Verluste auf, verursacht durch Spannungsoberschwingungen [4]. Die Oberschwingungsverluste lassen sich vorausberechnen, wenn die Maschinenimpedanz in Abhängigkeit von Frequenz und Spannung bekannt ist. Es wurde durch Versuche gezeigt, dass bei korrekter Antriebsauslegung bis herunter zur halben Bemessungsdrehzahl keine unzulässigen Temperaturen zu erwarten sind. Diese Annahme trifft für die meisten eigengekühlten Maschinen zu. Die Temperaturzunahme gegenüber dem Betrieb am Netz von ca. 10 K ist im Allgemeinen unkritisch, da der bei Netzbetrieb mögliche Blockierfall mit Strömen bis zum zehnfachen des Bemessungswertes und sehr grossen Erwärmungen nicht auftreten kann. Es sind daher höhere Dauerbetriebserwärmungen zulässig.

Wird die Drehzahl weiter reduziert, darf der Motor aus Gründen der Kühlung nicht mehr mit dem maximalen Drehmoment betrieben werden. Die Überwachung der Drehmomentenreduzierung kann durch eine in der Umrichtersteuerung implementierte drehzahlabhängige Begrenzung des Dauerbetriebsstromes sichergestellt werden.

Zur Reduzierung der durch den Frequenzumrichter bedingten Oberschwingungsverluste kann ein Sinus-Ausgangsfilter nachgeschaltet werden. Hierbei müssen jedoch die Spannungsabfälle am Filter berücksichtigt werden, um ein Ansteigen der Grundschwingungsverluste durch den Betrieb mit Unterspannung zu verhindern.

Wärme wird abgeleitet

Der grösste Anteil der Verlustwärme wird durch erzwungene Konvektion (Ventilator) abgeleitet [5], ein kleiner Teil geht durch Wärmestrahlung an die Umgebung und Wärmeleitung zum Maschinenfundament über. Die Güte der Kühlung kann analog zum elektrischen Stromkreis durch den Wärmeübergangswiderstand gemäss Gleichung (1) ausgedrückt werden.

R_{therm} thermischer Widerstand
C_{therm} Wärmekapazität
P_V Verlustleistung
Q gespeicherte Wärmeenergie
ΔT Übertemperatur zur Raumtemperatur

$$R_{therm} = \frac{\Delta T}{P_V} \qquad (1)$$

$$\Delta T = Temperaturdifferenz\ mit\ \frac{dQ}{dt} \sim P_V$$

Die dauernd zulässige Verlustleistung kann berechnet werden:

$$P_V \leq \frac{\Delta T_{zulässig}}{R_{therm}} \quad (stationär) \qquad (2)$$

Bei bekannter Verlustleistung und thermischem Widerstand kann die Temperatur im stationären Fall über Gleichung (2) sowie im instationären Fall für den Zeitpunkt t über

$$\Delta T(t) = \frac{P_V}{R_{therm}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_{therm} \cdot C_{therm}}}) \qquad (3)$$

berechnet werden. Für einen sicheren Betrieb muss zu jedem Zeitpunkt gelten:

$$\Delta T(t) \leq \Delta T_{zulässig} \qquad (4)$$

Die Wärmeübergangswiderstände zwischen dem Gehäuse und den inneren Maschinenteilen sind bei einer oberflächengekühlten Maschine nur geringfügig von der Drehzahl abhängig. Dies gilt zum Beispiel für den Rotor im üblichen Drehzahlstellbereich; die Wärmeübergangswiderstände zwischen dem Gehäuse und dem Ständerblechpaket sowie zwischen dem Ständerblechpaket und der Wicklung sind überhaupt nicht von der Drehzahl abhängig. Für den stationären Betrieb muss daher nur der stark drehzahlabhängige Wärmeübergangswiderstand zwischen dem Gehäuse und der Umge-

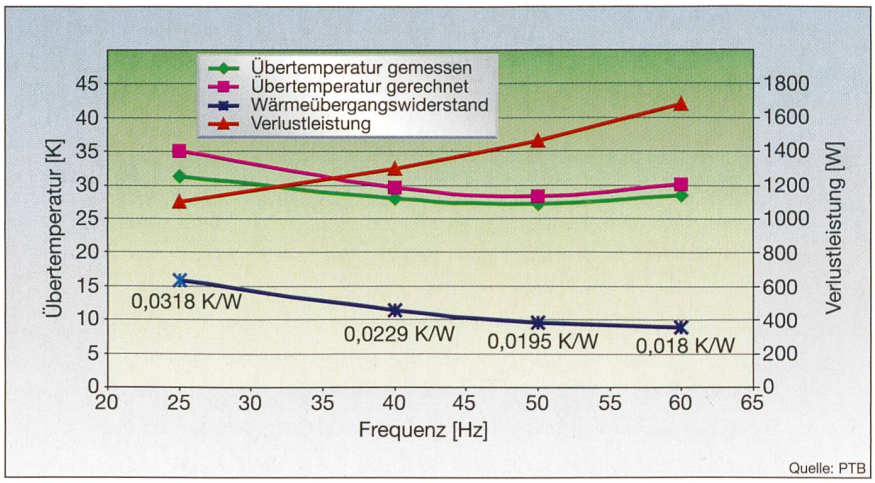

Bild 3 Verlauf des Wärmeübergangswiderstandes und der Verlustleistung bei konstantem Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl

bung betrachtet werden. Die Temperaturen innerhalb der Maschine lassen sich durch Berechnungen mit ausreichender Genauigkeit bestimmen. In Bild 3 ist der Zusammenhang zwischen dem Wärmeübergangswiderstand und der Drehzahl beispielhaft dargestellt.

Wärmeübergangswiderstand bestimmen

Zur experimentellen Bestimmung des drehzahlabhängigen Wärmeübergangswiderstandes zwischen Gehäuse und Umgebung wurde das Blechpaket des Rotors entfernt und die Welle mit dem Lüfter mit definierter Drehzahl angetrieben. Die Verlustleistung wurde durch Beheizen der Ständerwicklung mit Gleichstrom simuliert. Durch Messung der sich einstellenden Beharrungstemperaturen bei verschiedenen Drehzahlen kann man auf den Wärmeübergangswiderstand schliessen. Der Versuchsaufbau ist in Bild 5 dargestellt.

Die Wärmeübergangswiderstände zwischen den einzelnen Maschinenteilen lassen sich über eine Messung der Temperaturdifferenz zwischen den Teilen bei bekannter Verlustleistung berechnen. Die Verlustleistung kann entweder direkt bestimmt werden (z.B. Ständerkupfer, Ständereisen) oder muss über eine Differenzbildung zwischen der gesamten Verlustleistung der Maschine (aufgenommene elektrische Leistung minus abgegebene mechanische Leistung) und den bereits bekannten Verlustleistungen einzelner Maschinenteile bestimmt werden. Für eine grobe Abschätzung kann auch eine indirekte Verlustbestimmung [3] ohne Messung der tatsächlichen abgegebenen mechanischen Leistung und ohne Berücksichtigung von Stromverdrängungseffekten [4] durch die Oberschwingungen im Maschinenstrom durchgeführt werden. Mit diesen Daten ist es möglich, die Temperatur einzelner Maschinenteile in Abhängigkeit von der Lüfterdrehzahl für den stationären Betriebsfall vorauszuberechnen. Bei dynamischen Vorgängen müssen in der Energiebilanz auch die Wärmekapazitäten berücksichtigt werden [6].

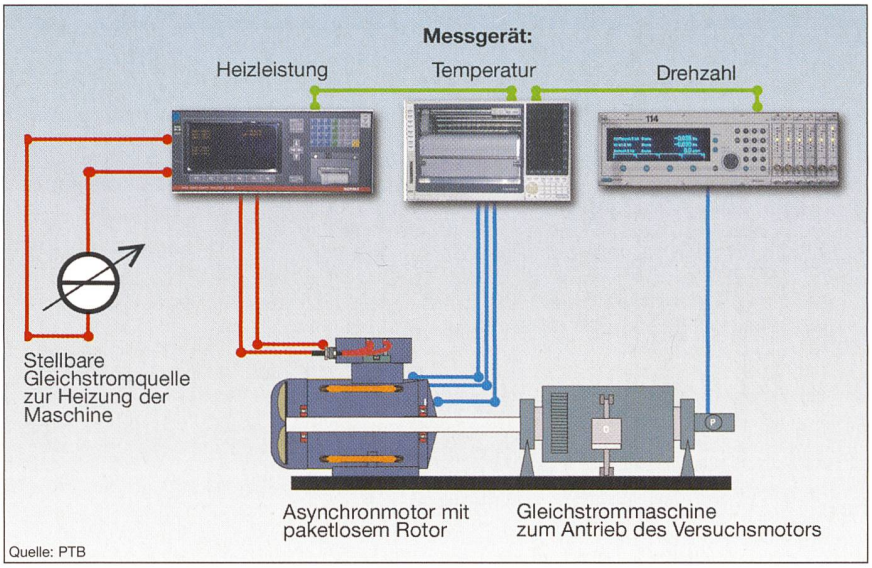

Bild 4 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wärmeübergangswiderstandes

Verluste bei einer umrichtergespeisten Maschine

Neben den auch bei netzgespeisten Maschinen immer vorhandenen Grundschwingungsverlusten treten nun zusätzlich Oberschwingungsverluste auf. Die Oberschwingungsverluste sind von der Betriebsweise des Umrichters sowie von der Versorgungsspannung des speisenden Netzes abhängig und lassen sich rechnerisch abschätzen [7].

Der grösste Teil der Oberschwingungsverluste wird im Blechpaket der Maschine umgesetzt (Eisenverluste). Zur messtechnischen Bestimmung wurde die Asynchronmaschine (Baugrösse 132) mit einem Rotor bestückt, dessen Stäbe und Kurzschlussringe durch elektrisch isolierende Materialien ersetzt wurden. Der Rotor wurde mit einer zweiten Maschine grundschwingungssynchron angetrieben. Der Versuchsaufbau ist in Bild 6 dargestellt.

Die Speisung der Versuchsmaschine erfolgte wahlweise über einen Frequenzumrichter bzw. über das im *Bulletin SEV/VSE* 7/03 behandelte Leistungsverstärkersystem. Die Versuche lieferten das folgende Ergebnis (Bild 7).

Wird dieser Versuch mit einem kompletten Rotor durchgeführt, können die gesamten oberschwingungsbedingten Verluste der Maschine ermittelt werden. Aus einer Differenzbildung zwischen beiden Messungen können dann die oberschwingungsbedingten Rotorkupferverluste bestimmt werden.

In Bild 7 ist recht gut erkennbar, dass die Oberschwingungsverluste als ein konstanter, von der Grundschwingungsspannung unabhängiger Offset zu den Grundschwingungseisenverlusten addiert werden können (Verlauf der Kurven «50 Hz Sinus» und «50 Hz Umrichter»). Bei Bemessungsspannung ist der Anteil der Oberschwingungsverluste an den gesamten Eisenverlusten und somit an den gesamten Maschinenverlusten gering und führt nur zu Temperaturerhöhungen von 5 bis 15 K.

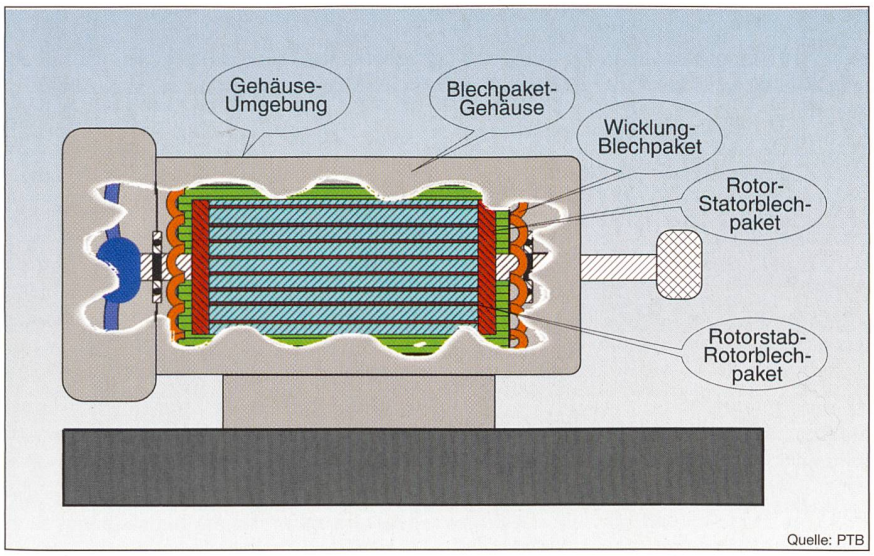

Bild 5 Innere Wärmeübergangswiderstände einer Asynchronmaschine

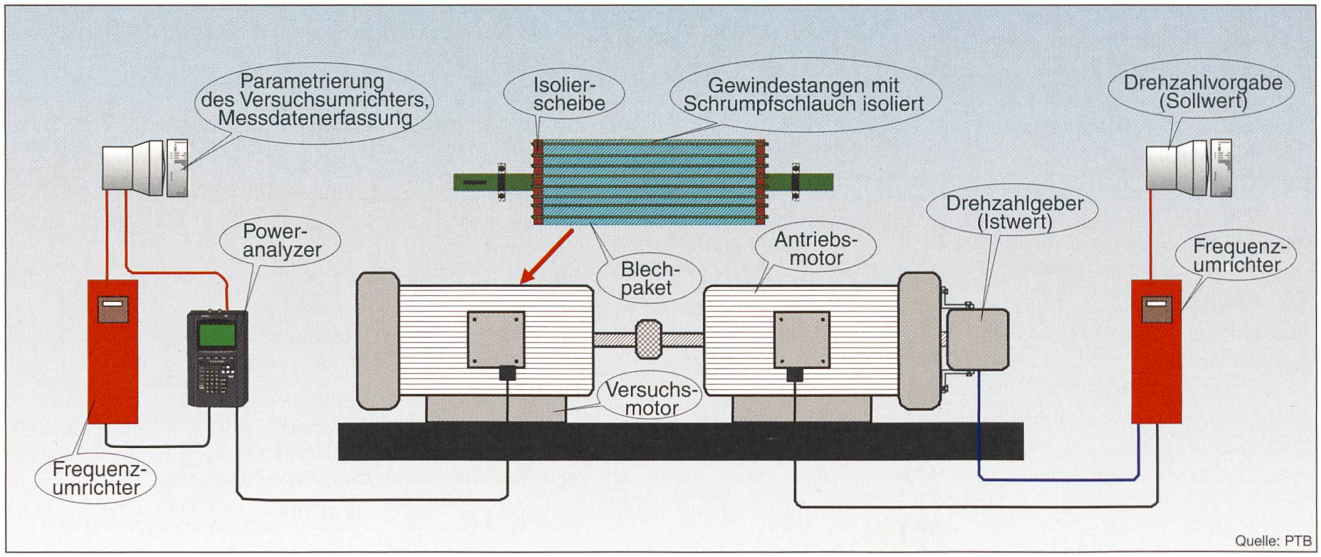

Bild 6 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Eisenverluste

Bei einer Erhöhung der Umrichtereingangsspannung nimmt der Anteil der Eisenverluste jedoch zu (Erhöhung des Oberschwingungsanteiles). Durch den Einsatz eines Filters im Umrichterausgang können die Oberschwingungsverluste gesenkt werden [8, 9]. Es muss dabei aber der Spannungsabfall am Ausgangsfilter beachtet werden, da sich eine Unterspannung an den Maschinenklemmen drastisch auf die Maschinenerwärmung auswirken kann.

Betrieb bei Unterspannung

Um den Betrieb bei Unterspannung zu untersuchen, wurde eine Maschine der Baugrösse 180 mit dem Bemessungsdrehmoment belastet und über eine 80 Meter lange Leitung mit dem Frequenzumrichter[1)] verbunden (Simulation des ungünstigsten Betriebsfalls). Der Frequenzumrichter wurde über einen Stelltransformator aus dem Netz zunächst mit 400 V und anschliessend mit 380 V (400 V –5%, Bereich A) und mit 360 V (400 V –10%, Bereich B) gespeist.

Mit der Abnahme der Umrichtereingangsspannung erfolgte eine drastische Temperaturzunahme der Maschine, die um ein Vielfaches über der durch die Oberschwingungsverluste verursachten Erwärmung liegt. Bedingt durch den bei abnehmender Klemmenspannung zunehmenden Schlupf und damit höheren Rotorverlusten nimmt die Temperatur des Rotors überproportional zu. Dies ist in Bild 8 gut erkennbar.

Bereits bei einer Absenkung der Netzspannung um 5% nimmt die Rotortemperatur um circa 30 K zu. Da derartige Spannungsschwankungen im Versorgungsnetz jederzeit auftreten können, müssen Vorkehrungen getroffen werden, damit der Explosionsschutz gewährleistet wird.

Wird ein Sinusfilter eingesetzt, muss der Spannungsabfall entsprechend berücksichtigt werden. Als Schutz kann zum Beispiel der Strom für den Dauerbetrieb auf den Maschinenbemessungsstrom begrenzt werden. Alternativ kann auch die Temperatur der Maschine überwacht werden.

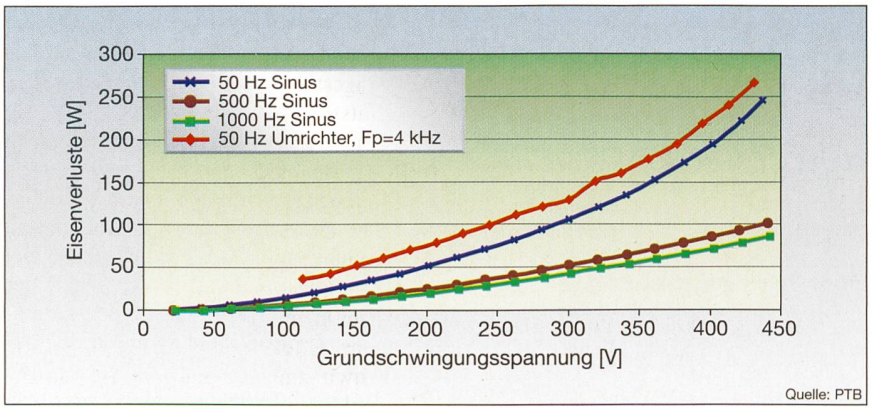

Bild 7 Oberschwingungseisenverluste bei einer Maschine der Baugrösse 132

Ergebnisse bisheriger Untersuchungen

Erwärmungsmessungen an verschiedenen Umrichtern[2)] zeigen, dass die Temperatur bei einem Weitspannungsumrichter im ungünstigsten Fall[3)] um maximal 15 K höher liegt, als wenn der Motor direkt am Netz betrieben wird. Die Erwärmung durch die Oberschwingungen ist nahezu unabhängig von der Grundschwingungsspannung. So sind in Bild 7 die Kurven «50 Hz Sinus» und «50 Hz Umrichter» zwar parallel verschoben, sonst aber beinahe gleich. Hieraus folgt, dass die Oberschwingungsverluste auch im Betrieb bei kleinen Frequenzen und kleinen Grundschwingungsspannungen unverändert vorhanden sind.

Um zu berechnen, ob die Erwärmung durch Oberschwingungen für den Explosionsschutz relevant ist, wird diese von der Bemessungsdrehzahl auf die minimale Drehzahl des Motors umgerechnet. Hierzu das folgende Beispiel: Unter der Annahme, dass die gesamten Oberschwingungsverluste im Stator der Maschine umgesetzt werden, erwärmt sich der Stator bei einer Maschine der Baugrösse 180 bei 25 Hz um etwa 12 K. Die gesamten Verluste bei Frequenzumrichterspeisung sind bei diesem Versuch etwa 170 W grösser als beim Betrieb am Netz. Diese zusätzliche Erwärmung ist aber im Vergleich zu der Erwärmung bei Unterspannung gering (Bild 8).

In der Tabelle sind für eine Maschine der Baugrösse 180 jeweils für das Gehäuse, die Ständerwicklung und den Rotor die Temperaturen, Verlustleistungen und thermischen Widerstände beim Betrieb am Frequenzumrichter bei konstantem Belastungsdrehmoment mit den

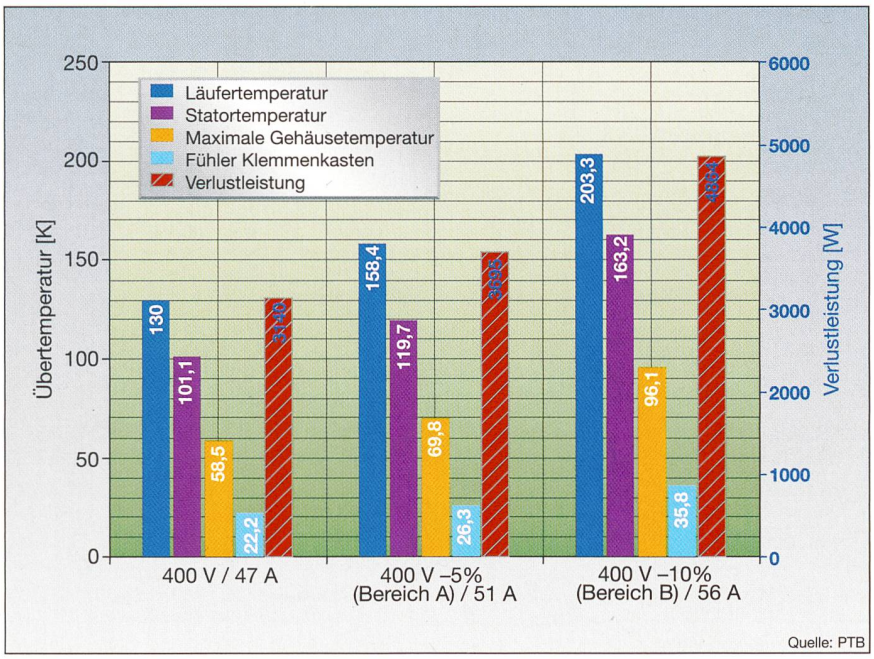

Bild 8 Auswirkung des Betriebes bei Unterspannung (hier durch zu geringe Umrichtereingangsspannung verursacht)

Frequenzen 25, 40 und 50 Hz gegenübergestellt. Die Rotorverluste wurden für eine grobe Abschätzung über ein indirektes Verfahren [3] ohne Berücksichtigung der Stromverdrängungseffekte in Stator [4] und Rotor ermittelt. Die thermischen Widerstände wurden für 50 Hz aus den Erwärmungen und Verlustleistungen ermittelt und gemäss dem Verlauf der Kurve in Bild 3 auf den Betrieb bei 40 Hz und 25 Hz umgerechnet. Für den Stator und den Rotor wurde nur der im thermischen Widerstand enthaltene Anteil Gehäuse-Umgebung mit der Frequenz umgerechnet, die anderen Anteile werden in dieser Abschätzung als drehzahlunabhängig angesehen. Der Tabelle liegt ein Betrieb mit einem Belastungsdrehmoment von 105 Nm zu Grunde.

Beim Betrieb mit Bemessungsdrehmoment (140 Nm) ergibt sich zum Vergleich bei 25 Hz eine Temperaturerhöhung von 8 K gegenüber dem Betrieb bei 50 Hz. Unterhalb von 25 Hz können je nach Auslegung der Maschine bei vollem Belastungsdrehmoment unzulässige Temperaturen auftreten. Die Werte in Tabelle I verdeutlichen, dass sich die Temperaturen bei einer Änderung der Drehzahl rechnerisch abschätzen lassen, ausgehend von den Temperaturmesswerten im Bemessungsbetriebspunkt. Die Verlustleistung wurde indirekt bestimmt, und es wurde berücksichtigt, dass der Wärmeübergangswiderstand Gehäuse-Umgebung von der Lüfterdrehzahl abhängig ist.

Das Verfahren ist insbesondere für die Nachrüstung von Antrieben mit Frequenzumrichtern interessant. Ausgehend von einer bestehenden Messung am Netz und den an einer Maschine gleicher Gehäusebauform ermittelten Kühlungseigenschaften kann für kleine Drehzahlen die maximal zulässige Verlustleistung abgeschätzt und der Antrieb entsprechend parametriert werden.

Aus den bisher durchgeführten Versuchen lässt sich ableiten, dass für die meisten eigengekühlten Maschinen mit einem und zwei Polpaaren ein Betrieb mit konstantem Belastungsdrehmoment bis zu einer Frequenz von 25 Hz problemlos möglich ist. Für kleinere Frequenzen muss die erreichte Temperatur durch einen Versuch ermittelt oder rechnerisch abgeschätzt werden.

Beim neuen Zulassungskonzept wurde der so genannte «Kurzschluss» der Maschine nicht betrachtet (wenn sie bei voller Klemmenspannung blockiert). Daher sind im Dauerbetrieb höhere Temperaturen zulässig, eine Reserve für den Fall einer Blockierung wird nicht eingerechnet. Dies setzt voraus, dass der maximale Ausgangsstrom des Umrichters begrenzt wird, zum Beispiel auf den zweifachen Wert des Bemessungsstromes während einer Minute.

	Temperatur gemessen	Verlust-leistung	Therm. Widerstand	Temperatur gerechnet
Betrieb bei 50 Hz, 105 Nm (Basis)				
Gehäuse	28,8 K	1545 W	0,0186 K/W	Ref.-Messung
Statorwicklung	56,5 K	1138 W	0,0496 K/W	Ref.-Messung
Rotor	79,2 K	407 W	0,1945 K/W	Ref.-Messung
Betrieb bei 40 Hz, 105 Nm				
Gehäuse	29,7 K	1366 W	0,0218 K/W	29,9 K
Statorwicklung	56,2 K	1010 W	0,0529 K/W	53,4 K
Rotor	71,6 K	356 W	0,1978 K/W	70,4 K
Betrieb bei 25 Hz, 105 Nm				
Gehäuse	31,8 K	1167 W	0,0304 K/W	35,5 K
Statorwicklung	58,2 K	846 W	0,0614 K/W	52,0 K
Rotor	70,7 K	320 W	0,2064 K/W	66,0 K

Tabelle Rechnerische Temperaturabschätzung bei Drehzahländerung eigengekühlter Maschinen

Explosionsschutz sicherstellen

Der Explosionsschutz wird durch folgende Massnahmen sichergestellt:

1. Die Stromgrenzen des Frequenzumrichters für den dauernd zulässigen Strom und den Kurzzeitstrom werden auf den Maschinenbemessungsstrom bzw. den doppelten Bemessungsstrom eingestellt. Die Zeit, in der der Kurzzeitstrom fliessen kann, muss auf einen Wert begrenzt werden, innerhalb der die Maschine keine unzulässigen Temperaturen annehmen kann.
2. Der Oberschwingungsanteil der Umrichterausgangsspannung muss begrenzt werden. Als einfaches Kriterium kann hier die Differenz zwischen dem Effektivwert und der Grundschwingungsspannung an den Maschinenklemmen herangezogen werden. Dieser Wert sollte kleiner als die

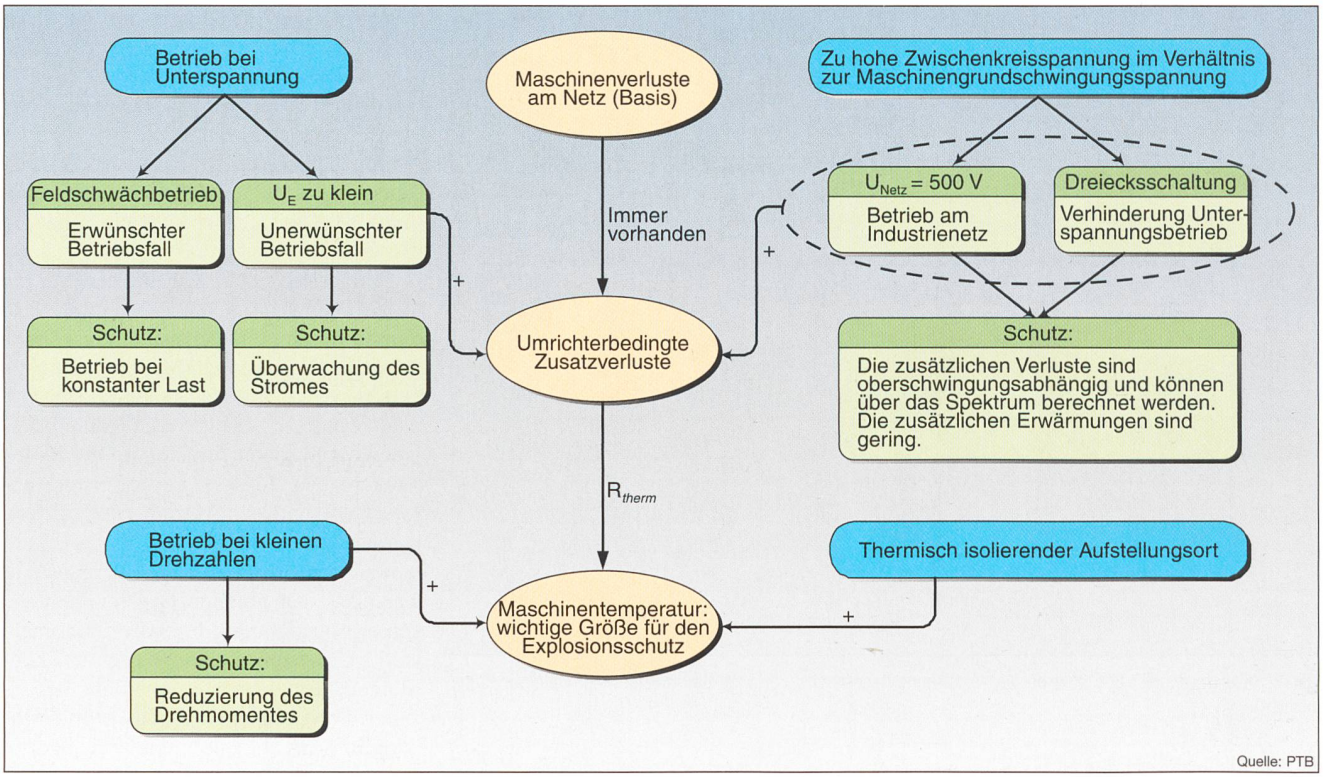

Bild 9 Sicherstellung des Explosionsschutzes bei umrichtergespeisten Antrieben

Grundschwingungsspannung selbst sein.

3. Die Frequenz, bis zu der eigengekühlte Motoren mit vollem Drehmoment betrieben werden dürfen, muss nach unten begrenzt werden. Für die meisten Maschinen ist eine Begrenzung bei 25 Hz geeignet. Unterhalb dieser Grenzfrequenz muss die Dauerstromgrenze des Umrichters linear mit der Frequenz abgesenkt werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Nach oben muss die Drehzahl generell aus Gründen der mechanischen Festigkeit begrenzt werden. Um im Feldschwächbetrieb unzulässige Erwärmungen zu verhindern, muss das Belastungsdrehmoment reduziert werden. Durch die korrekt auf den Maschinenbemessungsstrom eingestellte Stromgrenze für den Dauerbetrieb wird dieser Fall schutztechnisch abgedeckt.
4. Die Ausfallsicherheit der Schutzeinrichtung muss sichergestellt werden. Da die meisten Schutzfunktionen über die Steuersoftware des Frequenzumrichters realisiert werden können, sollte ein Back-up-Schutz über einen Kaltleiter in der Maschinenwicklung zusammen mit einem funktionsgeprüften Überwachungsgerät realisiert werden, um den Forderungen in der Richtlinie 94/9 EG zu genügen. Als Nebeneffekt wird hierdurch auch der Störfall «verstopfte Kühlluftwege» überwacht.
5. Die Temperaturgrenzen der verwendeten Isolierstoffe sowie Anbauteile müssen eingehalten werden.

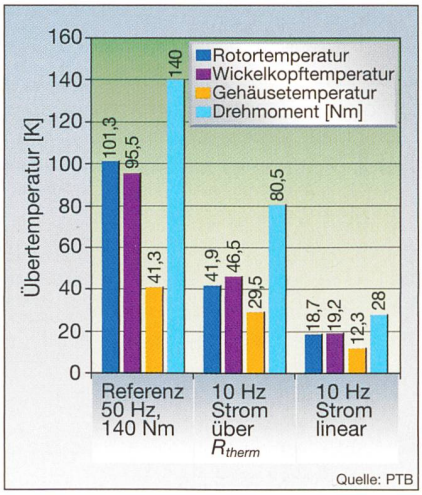

Bild 10 Bessere Maschinenausnutzung durch Optimierung des Schutzkonzeptes

In Bild 9 sind die für den Explosionsschutz wichtigen Randbedingungen in einer Übersicht zusammengefasst. Viele Randbedingungen lassen sich mit den heute am Markt befindlichen Umrichtertypen problemlos erfüllen. Lediglich die Funktion «Frequenzvariable Stromgrenze» ist meistens nicht vorhanden. Mit der heute üblichen Mikroprozessoren und Softwareprogrammierung der Umrichter lässt sich diese Funktion aber problemlos implementieren.

Sollen bereits bestehende Antriebssysteme mit einem Frequenzumrichter nachgerüstet werden, muss neben der Erwärmung auch ein Augenmerk auf die elektrische Festigkeit der Wicklung gerichtet werden. Besonders bei langen Leitungswegen zwischen Frequenzumrichter und Maschine können an den Maschinenklemmen Spannungsspitzen bis zum doppelten Wert der Grundschwingungsspannung auftreten. Dies kann bei älteren Wicklungsisolationen mit ungenügender elektrischer Festigkeit zu zündfähigen Durchschlägen führen. Bei älteren Maschinen sollte daher ein Sinusfilter im Umrichterausgang in Erwägung gezogen werden [10].

Verfahren weiter optimieren

Das beschriebene Verfahren ermöglicht, in der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» ausgeführte Motoren zuzulassen, ohne sich auf einen bestimmten Umrichtertyp festzulegen. Das Verfahren ist einfach und bietet ein hohes Mass an Sicherheit. Da jeweils von den ungünstigsten Betriebsfällen ausgegangen wird, sind im Mittel zwischen der zulässigen und der tatsächlichen Temperatur eines Maschinenteiles Sicherheitsreserven vorhanden.

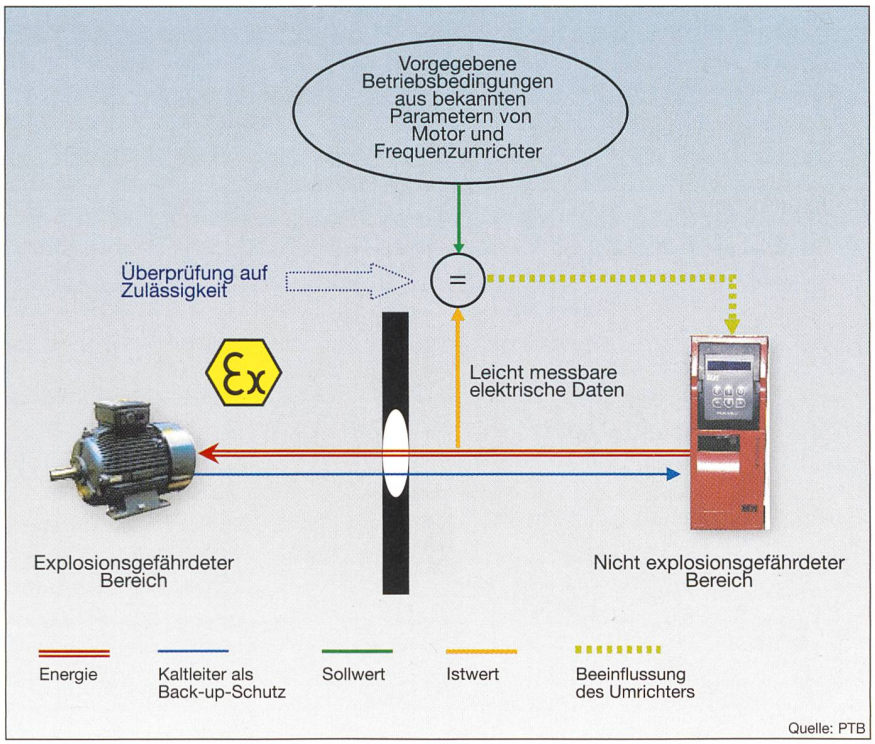

Bild 11 Flussdiagramm eines optimierten Motorschutzkonzeptes

Wenn zum Beispiel der Strom nicht linear mit der Frequenz, sondern mit dem Verlauf des Wärmeübergangswiderstandes reduziert wird, erhöht sich das verfügbare Drehmoment in Bild 10 bei 10 Hz von 28 Nm auf 80 Nm. Ähnlich ist es bei den Oberschwingungsverlusten. Auch hier können die Verluste über eine Fourieranalyse der Umrichterausgangsspannung und Bestimmung der Impedanzkennlinie der Maschine berechnet werden, so dass die Maschinenausnutzung ohne Absenkung des Sicherheitsniveaus verbessert werden kann.

Diese Optimierungen werden sich bei Kleinmaschinen nicht lohnen, da eine leichte Überdimensionierung der Maschine günstiger ist. Bei grösseren Asynchronmaschinen sind solche Optimierungen jedoch interessant.

In einem weiteren Schritt kann die thermische Trägheit der Maschine berücksichtigt werden. Dadurch sind kurzfristig Betriebszustände möglich, die im Dauerbetrieb zu unzulässigen Erwärmungen führen würden. Der Umrichter muss also die Historie des Antriebes berücksichtigen und die Temperatur zusammen mit den aktuellen Betriebsdaten berechnen (Bild 11). Als zusätzlicher Schutz sollte ein Kaltleiter mit funktionsgeprüftem Auslösegerät vorgesehen werden [11, 12]. Ohne Kaltleiter würden sich die Anforderungen an die Schutzfunktionen im Frequenzumrichter drastisch erhöhen.

Referenzen

[1] K. Hofbauer: Vergleich explosionsgeschützter elektrischer Maschinen in den Zündschutzarten e, d, p, n. Veröffentlichung in «Lift-Report», Heft 4/1999, Seiten 32–40

[2] PTB – Prüfregel Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart «Erhöhte Sicherheit» Ex e

[3] DIN-EN 60034 Teil 2, 1998

[4] A. Heimbrock: Analyse der Oberschwingungsverluste zweipoliger Induktionsmaschinen, Dissertation Universität Hannover, 2003

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

[6] T. Vetter, Überwachung und Prädiktion des Erwärmungsverhaltens einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer mittels Parameterschätzung, Dissertation TH Darmstadt, 1988

[7] C. Lehrmann, U. Engel, F. Lienesch: Verluste umrichtergespeister Induktionsmaschinen in Funktion der Betriebsparameter, Veröffentlichung im *Bulletin SEV/VSE* 7/03, Seiten 9 –15

[8] A. Schindler: Betriebsverhalten und Verluste von Asynchron-Käfigläufermotoren beim Betrieb am Transistor-Pulswechselrichter, Dissertation TH Darmstadt, 1985

[9] I. Richter: Durch Pulswechselrichter hoher Taktfrequenz bedingte Verluste in Induktionsmaschinen, Dissertation TH Aachen, 1987

[10] F. Lienesch: Untersuchungen zum Durchschlag brennbarer Gase als Beitrag zum Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel, Dissertation TU Braunschweig, 1999

[11] DIN-EN 50019 2000

[12] EU-Richtlinie 94/9/EG (ATEX 118a)

Weiterführende Literatur

F. Brosch: Moderne Stromrichterantriebe, Vogel-Verlag Würzburg, 1998

A. Mütze: Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors, Dissertation Universität Darmstadt, 2004

H. O. Seinsch: Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe, Teubner-Verlag, 1993

N. Beständig: Ermittlung der Ströme, Verluste und Erwärmungen eines Asynchron-Normmotors bei stationärem Betrieb an einem selbstgeführten Stromrichter mit konstanter Eingangsgleichspannung, Dissertation Universität Karlsruhe, 1986

A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, M. Pastorelli: About the Possibility Defining a Standard Method for Iron Loss Measurement in Soft Magnetic Materials with Inverter Supply, Veröffentlichung in «IEEE Transactions on Industry Applications», 1997, Heft 5, Seiten 1283–1288

A. Boglietti, O. Bottauscio, M. Chiampi, M. Pastorelli, M. Repetto: Computation and Measurement of Iron Losses under PWM Supply Conditions, Veröffentlichung in «IEEE Transactions on Magnetics», 1996, Heft 5, Seiten 4302–4304

Angaben zum Autor

Dipl. Ing. ***Christian Lehrmann*** arbeitet im Laboratorium Explosionsgeschützte Maschinen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.
christian.lehrmann@ptb.de

[1] Pulsumrichter, 4 kHz Taktfrequenz

[2] Es wurden verschiedene aktuelle Spannungszwischenkreisumrichter getestet

[3] Betrieb des Umrichters mit dem höchsten Wert des zulässigen Netzspannungsbereiches, z. B. 500 V

Protection antidéflagrante pour entraînements à convertisseur

Projet pour un nouveau concept d'homologation

Actuellement, lors de l'homologation d'un moteur du mode de protection «sécurité augmentée», le moteur et le convertisseur sont testés et certifiés comme unité fonctionnelle. Si l'on veut remplacer un composant ultérieurement, il faut s'attendre à une nouvelle certification coûteuse. Le concept d'homologation proposé tient compte des pertes supplémentaires en cas d'exploitation avec convertisseur et montre comment on peut évaluer l'échauffement. Ainsi, un moteur peut être utilisé en toute sécurité avec un convertisseur sans que le tout doive être testé comme unité fonctionnelle.

Signalausbreitung

Signale, die ankommen. Mit der Tonfrequenz-Rundsteuerung von ENERMET erreichen Sie jede Stelle in Ihrem Verteilnetz. Damit Sie überall schalten können. Tarife, Boiler, Elektroheizungen, Strassenbeleuchtungen und vieles mehr. Sofort, rasch und zuverlässig.

Schliesslich geht es um die Sicherheit der Elektrizitätsversorgung, um die faire Behandlung Ihrer Kunden und nicht zuletzt um Ihre Wettbewerbsfähigkeit.

ENERMET – Die Rundsteuer-Experten

ENERMET AG ■ UNDERMÜLISTR. 28 ■ CH-8320 FEHRALTORF
TEL. ++41 (0)1 954 81 11 ■ FAX ++41 (0)1 954 81 01 ■ www.enermet.ch

ENERMET