Verluste umrichtergespeister Induktionsmaschinen in Funktion der Betriebsparameter

Autor(en): **Lehrmann, Christian / Engel, Ulrich / Lienesch, Frank**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **94 (2003)**

Heft 7

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857535

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

Verluste umrichtergespeister Induktionsmaschinen in Funktion der Betriebsparameter

Nachbildung realer Umrichter mit einem Linearverstärkersystem zur Erfassung der Oberschwingungsverluste und der Erwärmung

Umrichtergespeiste Induktionsmaschinen erobern auf Grund vieler Vorteile einen immer grösseren Anteil an den in explosionsgefährdeter Umgebung eingesetzten Antriebssystemen [1]. Allerdings führt der Umrichtereinsatz zu erhöhten Maschinenverlusten und -erwärmungen gegenüber dem Betrieb am Netz. Wird die Maschine in der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» ausgeführt, müssen auch die maximalen Übertemperaturen an den inneren Maschinenteilen – beispielsweise an Ständerwicklung und Läuferkäfig – bekannt sein. Daher müssen zurzeit auch Maschine und Umrichter für die erwähnte Zündschutzart zusammen geprüft werden. Der vorliegende Beitrag zeigt die Umrichternachbildung durch ein 3-phasiges Leistungsverstärkersystem mit Arbiträrfunktionsgenerator sowie einem Ansatz zur Vorausberechnung der durch die in der Umrichterausgangsspannung enthaltenen Oberschwingungen verursachten zusätzlichen Verluste.

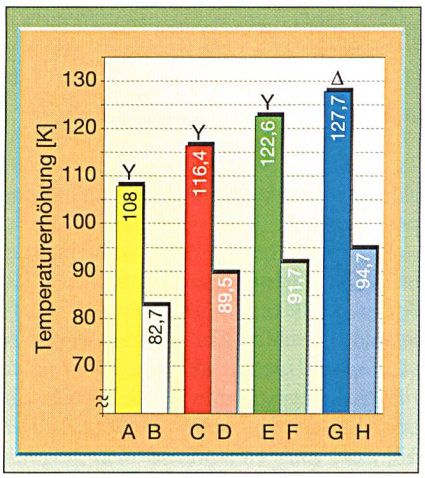


Bild 1 Veränderung der Dauerbetriebserwärmung der Maschine bei verschiedenen Betriebsparametern

Für A und B: Betrieb am 50-Hz-Netz; für C bis H: Umrichterbetrieb mit Taktfrequenz = 4 kHz
A: Rotor; B: Stator; C: Rotor (U_e = 420 V); D: Stator (U_e = 420 V); E: Rotor (U_e = 500 V); F: Stator (U_e = 500 V); G: Rotor (U_e = 400 V); F: Stator (U_e = 400 V)

Wird der Antrieb für explosionsgefährdete Bereiche in der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» ausgeführt, ist eine Kenntnis über die zu erwartenden Temperaturen in Ständer und Läufer sehr wichtig, da ein Überschreiten der für die jeweilige Temperaturklasse angegebenen

Christian Lehrmann, Ulrich Engel, Frank Lienesch

Grenztemperatur unbedingt verhindert werden muss [2, 3]. Entsprechend dem Stand der gültigen Normen muss zurzeit bei dieser Zündschutzart der Umrichter zusammen mit der Maschine, mit der er später betrieben werden soll, geprüft werden. Dies stellt einen nicht unerheblichen Prüfaufwand dar und benachteiligt die Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» gegenüber der «Druckfesten Kapselung», wo Motor und Umrichter nicht zusammen geprüft werden müssen.

Besteht jedoch die Möglichkeit, aus den Ausgangsgrössen (Strom, Spannung und Oberschwingungsspektrum) eine Vorhersage über die zu erwartenden Temperaturen zu treffen, kann auch in der Zündschutzart «Erhöhte Sicherheit» auf eine Prüfung der Kombination verzichtet werden, und für den Motor können Oberschwingungsgrenzwerte festgelegt werden, die vom Umrichter einzuhalten sind.

Als Voraussetzung dafür muss die Maschine mit einem Drehspannungssystem variabler Amplitude und Frequenz sowie frei definierbaren Oberschwingungsspektren gespeist werden können. Zu diesem Zweck wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) ein Leistungsverstärkersystem[1)] bestehend aus einem Funktionsgenerator (3 Kanäle) sowie 3 Leistungsverstärkern (einer je Phase) aufgebaut. Zwischen den Funktionsgenerator und die Verstärker wurde eine Symmetriereinheit geschaltet, die die geringen Spannungsunterschiede zwischen den Funktionsgeneratorausgängen ausgleicht.

Solche Verstärkersysteme werden sonst zur Prüfung der Reaktion von Geräten auf leitungsgebundene Störungen (EMV) verwendet. Zur Verminderung der in den Verstärkern umgesetzten Verlustleistung kann die Eingangsspannung über den Stelltransformator der jeweils

Dieser Fachbeitrag ist die Fortsetzung des im *Bulletin SEV/VSE* Nr. 15/2002 erschienen Beitrags «Oberschwingungsverluste und Erwärmungen umrichtergespeister Induktionsmaschinen», in welchem die einzelnen Einflussfaktoren für das thermische Verhalten dargestellt wurden (Bild 1). Ferner wurde gezeigt, dass alle Änderungen in den Betriebsparametern des Umrichters, die eine Veränderung des Oberschwingungsspektrums nach sich ziehen, Auswirkungen auf die Maschinenverluste haben [4, 5].

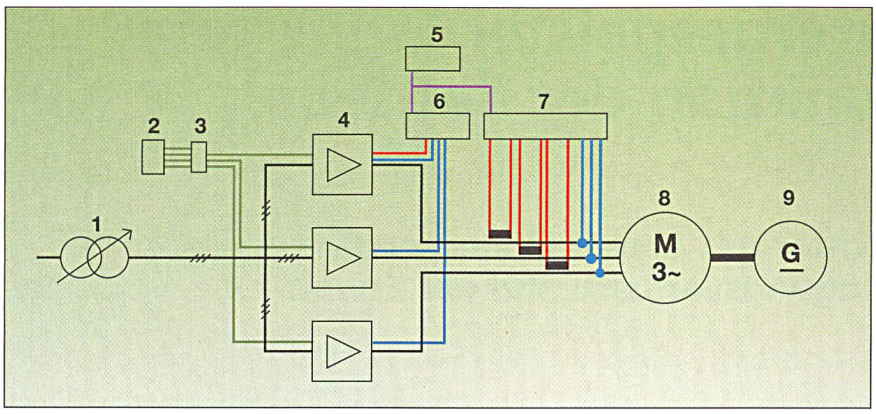


Bild 2 Schaltbild Versuchsaufbau

1: Drehtransformator 0–500 V; 2: Funktionsgenerator; 3: Ansteuerung und Abgleichbox; 4: Leistungsverstärker; 5: Messrechner; 6: Oszilloskop; 7: Leistungsmesser; 8: Drehstrommotor; 9: Belastungsmaschine (Gleichstromgenerator)

geforderten Ausgangsspannung angepasst werden.

Die Verstärkerendstufen sind temperaturüberwacht und bei Kurzschluss des Ausgangs oder bei überhöhter Verlustleistung geschützt. In jedem der 3 Verstärker sind potenzialfreie Messwandler für Ausgangsspannung und -strom mit den Übersetzungsverhältnissen 100 V/1 V bzw. 10 A/1 V vorhanden.

Die Verstärker können eine maximale Dauerleistung von 32 kVA abgeben, was etwa 24 kW bei cos φ = 0,75 entspricht. Sie gestatten sowohl spannungs- als auch stromgeregelten Betrieb. Es lassen sich daher auch Stromzwischenkreisumrichter nachbilden (Bild 2).

Prinzipiell können beliebige Kurvenformen nachgebildet werden, solange dem nicht durch das gespeiste Betriebsmittel vorgegebene Randbedingungen entgegenstehen. So würde etwa eine vorgegebene Stromänderung gemäss Formel 1 eine höhere Spannung U_i erfordern als die Zwischenkreisspannung des Verstärkers beträgt[2].

$$U_i = L \cdot \frac{di}{dt} \qquad (1)$$

mit

U_i als Selbstinduktionsspannung der allgemeinen Induktivität L bei einer zeitlichen Stromänderung di/dt.

Ein Schema des Versuchsaufbaus ist in Bild 3 dargestellt.

Grenzen des Verstärkersystems

Da die Höhe der Zwischenkreisspannung des Verstärkers grösser als die maximale Amplitude des gewünschten Signals einschliesslich der vorgegebenen Oberschwingungen sein muss und die maximale Versorgungsspannung der Verstärker 400 V beträgt, lassen sich z.B. die Spannungspulse eines mit 500 V gespeisten Umrichters nicht mehr nachbilden. Eine weitere Begrenzung stellt die obere Grenzfrequenz von 10 kHz dar, die es nicht erlaubt, die Spannungspulse mit Anstiegsgeschwindigkeiten von etwa 4 kV/µs originalgetreu nachzubilden. Daher wird die Umrichterausgangsspannung über die durch die Spektralanalyse ermittelten Oberschwingungsanteile bis zur Verstärkergrenzfrequenz simuliert. Durch den Vergleich der Verluste Umrichterbetrieb–Simulation über den Verstärker muss die Praxistauglichkeit in der Zukunft noch für verschiedene Umrichtertypen (I-Umrichter, unterschiedliche Modulationsverfahren beim U-Umrichter) gezeigt werden.

Signalerzeugung

Die Signalerzeugung wurde programmtechnisch über eine additive Verknüpfung des Grundschwingungssignals mit den hinzuzufügenden Oberschwingungen[3] (Bild 4) realisiert. Aus diesem Signal wird eine Periode herausgeschnitten und als x-y-Wertepaare zeilenweise in eine Textdatei geschrieben.

Die Kurve wird danach in den Funktionsgenerator übertragen, dessen 3 Kanäle dann frequenzmässig synchronisiert und über eine interne Funktion des Signalgenerators in eine feste Phasenbeziehung von 120° zueinander gesetzt werden.

Das Signal wird dann über eine Symmetriereinheit symmetriert. Bevor es den Leistungsverstärkern zugeführt wird, werden eventuell enthaltene Gleichspannungsanteile über einen Hochpass herausgefiltert.

Zur Überprüfung der Signalerzeugungskette (Software–Maschinenklemmen) wird das Signal an der Maschine mit einem digitalen Speicheroszilloskop[4] aufgezeichnet und mittels Software einer Fourieranalyse unterzogen. Die Messung der Spannung erfolgt hierbei potenzialfrei über einen kalibrierten Isolierverstärker hoher Bandbreite. Das ermittelte Spektrum wird dann mit den vorgegebenen Werten verglichen. Dieser Vergleich wird zu Beginn jeder Messung durchgeführt. Die Unterschiede zwischen vorgegebenem und gemessenem Spektrum sind sehr gering und bewegen

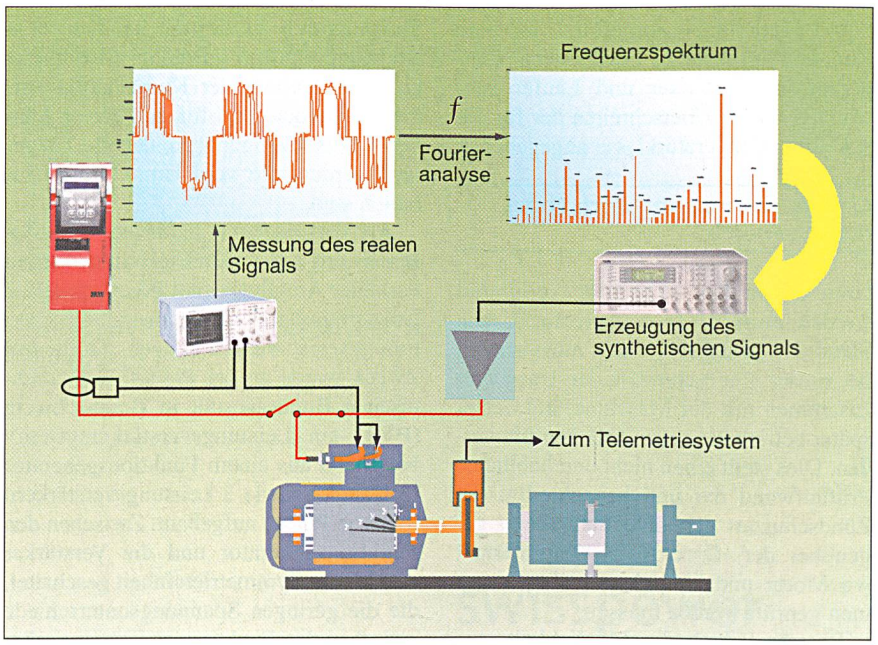


Bild 3 Schema des Versuchsaufbaus

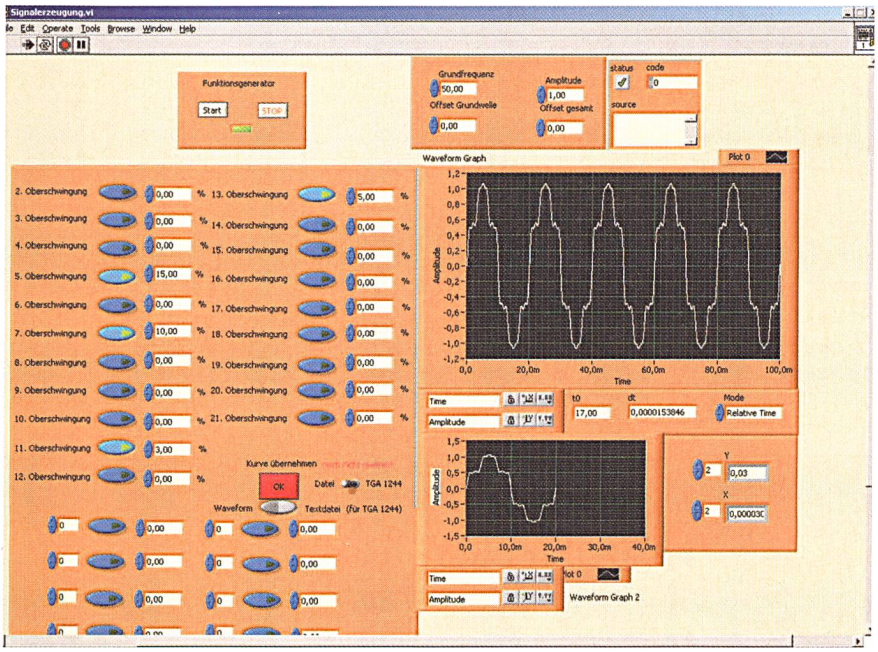


Bild 4 Screenshot Software zur Signalerzeugung (Testsignal)

sich im Bereich der Messunsicherheit der Spektralanalyse mit den dabei verwendeten Messmitteln (Bilder 5 und 6)

Versuchsdurchführung Verlustmessung

Bei den Versuchen zur Verlustbestimmung wird die Maschine vom Verstärkersystem mit einem vorgegebenen Oberschwingungsspektrum gespeist und mit dem gewünschten Drehmoment belastet (Gleichstromgenerator).

Die elektrischen Grössen werden mit einem kalibrierten Messgerät hoher Bandbreite[5)] aufgezeichnet (Bild 2).

Gemessen werden Strom, Spannung und Leistung sowie der Leistungsfaktor. Zur Minimierung der Messfehler bei der elektrischen Leistungsmessung wird die Spannung direkt an den Motorklemmen abgegriffen und über eine separate Leitung zum Messgerät geführt. Der Spannungsabfall in der Motorzuleitung zwischen Verstärker und Maschine geht nicht in die Messung ein und verfälscht somit auch nicht die Leistungsmessung.

Die abgegebene Leistung des Motors wird über die Messung des Drehmomentes mittels eines Drehmomentenmessflansches sowie über die Drehzahl berechnet. Aus der Differenz zwischen der elektrischen und der mechanischen Leistung lassen sich dann die Verluste des Induktionsmotors bestimmen. Die Temperatur wird am Gehäuse über Thermoelemente sowie im Rotor über ein mitrotierendes Telemetriesystem gemessen. Die Ständerwicklungstemperatur wird über die Widerstandserhöhung der Kupferwicklung bestimmt.

Die Messung ist mit Erreichen des thermischen Beharrungszustandes beendet.

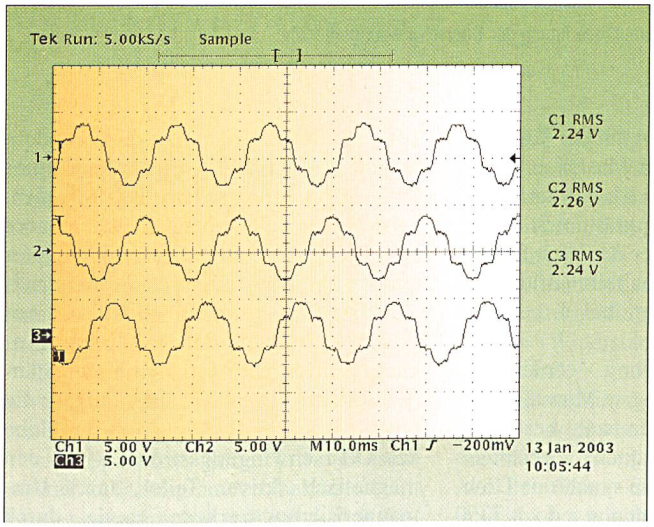


Bild 5 Spannungsverlauf 3-phasig am Ausgang der Verstärker

Vorgegebenes Testsignal mit OS: Grundschwingungsfrequenz: 50 Hz; 5. Oberschwingung (250 Hz) = 15%; 7. Oberschwingung (350 Hz) = 10%; 11. Oberschwingung (450 Hz) = 3 %; 13. Oberschwingung (650 Hz) = 5%

Auswertung der Versuche

Da mit dem Betrieb eines Induktionsmotors an einer Funktionsgenerator-Leistungsverstärker-Kombination als Spannungsquelle bisher keine Erfahrungen bestehen, musste zunächst überprüft werden, ob das Betriebsverhalten der Maschine bei rein sinusförmiger Spannung über die Verstärker zu den am Generator ermittelten Werten passt. Erwartungsgemäss sollten die Verluste am Verstärker etwas geringer sein als am Generator, da die in der Generatorspannung unvermeidbar enthaltenen Oberschwingungen fehlen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen I und II dargestellt:

Wie erwartet sind die am Verstärker ermittelten Dauerbetriebs- und Leerlaufverluste etwas geringer als bei Generatorspeisung. Dies ist durch die in der Netz- bzw. Generatorspannung unvermeidbar enthaltenen Oberschwingungen erklärbar. Das Ausgangssignal der Verstärker enthält keine messbaren Oberschwingungsanteile. Ausserdem ist die Impedanz des Verstärkersystems von der Maschine aus betrachtet mit wenigen mΩ – die Ausgangsspannung wird elektronisch geregelt, der Verstärkerausgang stellt für die von der Maschine erzeugten Oberschwingungen nach Auskunft des Herstellers quasi einen Kurzschluss dar – sehr viel kleiner als die des Generators,

	25 Hz		50 Hz	
	Verstärker	Generator	Verstärker	Generator
V_{Fe}	68 W	72 W	178 W	181 W
V_{Rbg}	18 W	19 W	49 W	50 W
U_0	190 V	190 V	380 V	380 V

Tabelle I Gegenüberstellung Generatorbetrieb–Verstärker: Leerlauf

V_{Fe}: Eisenverluste; V_{Rbg}: Reibungsverluste; U_0: Spannung, für die die Eisenverluste in der Tabelle ermittelt wurden.

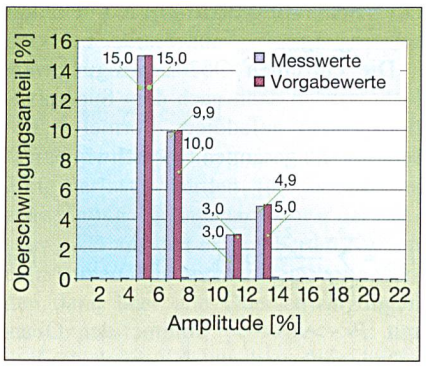


Bild 6 Fourieranalyse des Signals

Die Angaben beziehen sich auf das in Bild 4 dargestellte Signal.

d.h. die von der Maschine erzeugten Stromoberschwingungen führen daher nur zu sehr geringen Spannungsoberschwingungen (Kabelimpedanz).

Wurden dem Signal bewusst Oberschwingungen hinzugegeben, zeigte sich wie erwartet eine Erhöhung der Maschinenverluste und -erwärmungen (Tabelle II).

Frequenz		P_1 [W]	V_{CU1} [W]	s [%]	P_{2Dir} [W]	P_1–P_2 [W]
25 Hz	Generator	1835	131	4,61	1512	323
	Verstärker ohne OS	1805	130	4,9	1495	310
50 Hz	Generator	6451	409	5,5	5377	1074
	Verstärker ohne OS	6435	409	5,6	5368	1067
	Verstärker mit OS (Testsignal)	6539	437	5,8	5356	1182

Tabelle II Gegenüberstellung Generatorbetrieb–Verstärker: Dauerbetrieb

OS: Oberschwingungen; P_1: aus dem Netz aufgenommene elektrische Leistung; V_{Cu1}: in der Ständerwicklung der Maschine über $R \cdot I^2$ erzeugte Stromwärmeverluste; s = Schlupf; P_{2Dir}: abgegebene mechanische, aus dem gemessenen Drehmoment und der gemessenen Drehzahl berechnete Leistung; P_1–P_2: gesamte in der Maschine umgesetzte Verlustleistung

Vorgehensweise zur Bestimmung der Oberschwingungsverluste

Das Ziel der Untersuchungen war die Vorhersage der zu erwartenden Verluste bei Speisung mit dem realen Umrichter und mit bekanntem Spektrum.

Der im Folgenden betrachtete Ansatz beruht auf dem einphasigen Ersatzschaltbild (Bild 7) der elektrischen Maschine, wobei die Elemente des Ersatzschaltbildes für die einzelnen Oberschwingungsfrequenzen unterschiedliche Werte aufweisen: Jede Oberschwingung treibt durch das ihr zugeordnete Ersatzschaltbild entsprechend der Formel 2 einen Strom mit dem zugehörigen Leistungsfaktor cos φ_h.

$$I_h = \frac{U_h}{Z_h} \qquad (2)$$

mit I_h: durch die h-te Oberschwingung hervorgerufener Strom; U_h: durch die h-te Oberschwingung hervorgerufene Spannung; Z_h: Ersatz-Impedanz für die h-te Oberschwingung

Die Verlustleistung für die Oberschwingung der Ordnung h berechnet sich gemäss Formel 3.

$$P_h = U_h \cdot I_h \cdot \cos\varphi_h = \frac{U_h^2}{Z_h} \cdot \cos\varphi_h \qquad (3)$$

mit P_h: Verlustleistung der h-ten Oberschwingung; U_h: = durch die h-te Oberschwingung hervorgerufene Spannung; Z_h: = Ersatz-Impedanz für die h-te Oberschwingung

Die einzelnen Oberschwingungsverluste werden dann nach dem Superpositionsprinzip aufaddiert. Formel 4 beschreibt die gesamten Oberschwingungsverluste.

$$P_{vos} = \sum_{h=2}^{n} \frac{U_h^2}{Z_h} \cdot \cos\varphi_h \qquad (4)$$

mit P<–>vos<–>: Summe der Oberschwingungsverluste; U_h: durch die h-te Oberschwingung hervorgerufene Spannung; Z_h: Ersatz-Impedanz für die h-te Oberschwingung

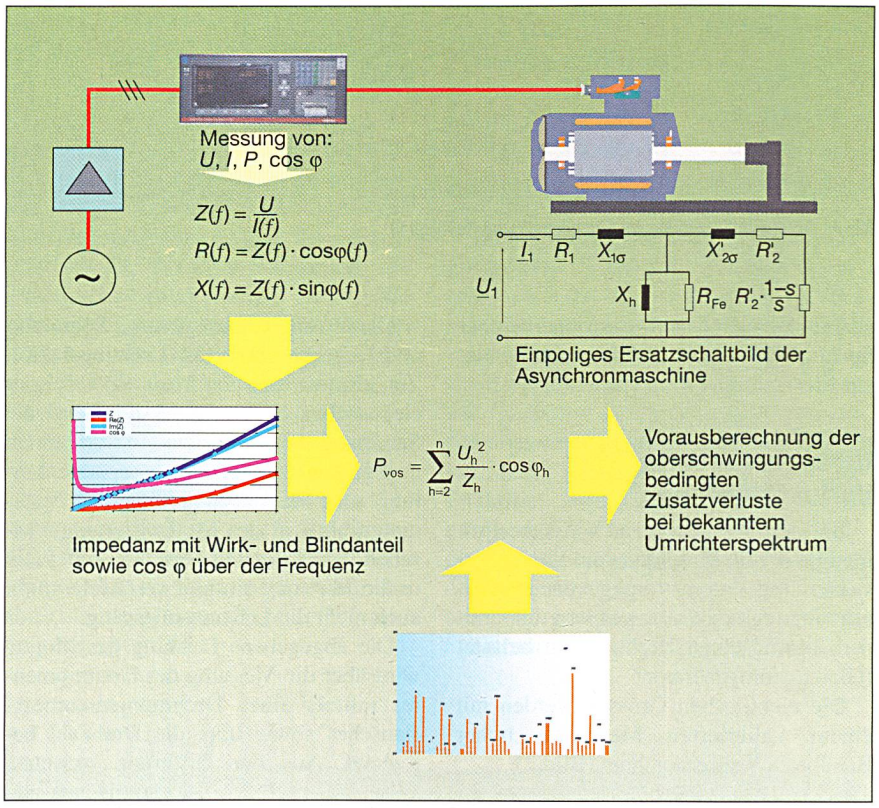


Bild 7 Ablaufschema zur Vorausberechnung der Oberschwingungsverluste

Dieser Ansatz beruht auf der Tatsache, dass sich der Rotor der Maschine für die Oberschwingungen auch bei Rotation mit Bemessungsdrehzahl[6)] quasi im Stillstand befindet. Es kann daher der Wert für den Schlupf s im Ersatzschaltbild (Bild 7) für die Oberschwingungen bei 1 belassen werden.

Folgende Überlegung verdeutlicht dies: Bei einer 4-poligen Maschine beträgt die Bemessungsdrehzahl bei 50 Hz Grundschwingungsfrequenz beispielsweise 1470 U/min[7)], die synchrone Drehzahl der 5. Oberschwingung jedoch 7350 U/min. Für diese Oberschwingung befindet sich der Rotor quasi im Stillstand, die Maschine für diese Frequenz im Kurzschluss. Die Durchflutungsgrundwellen von Ständer und Läufer, die von dem symmetrischen Dreiphasensystem einer Spannungsharmonischen erzeugt werden, heben sich weit gehend gegeneinander auf. Die Ströme in Ständer und Läufer werden überwiegend durch die frequenzabhängige Gesamtstreureaktanz begrenzt. Die Quellorte der Oberschwingungsverluste befinden sich in der Ständerwicklung und im Läuferkäfig – die Grösse ist dabei abhängig von der Höhe der Oberschwingungsströme –, in den magnetisch aktiven Teilen durch Ummagnetisierungsverluste sowie durch Querströme im Rotor bei geschrägten Nuten [5].

Die Strom begrenzende Impedanz setzt sich aus dem stark frequenzabhän-

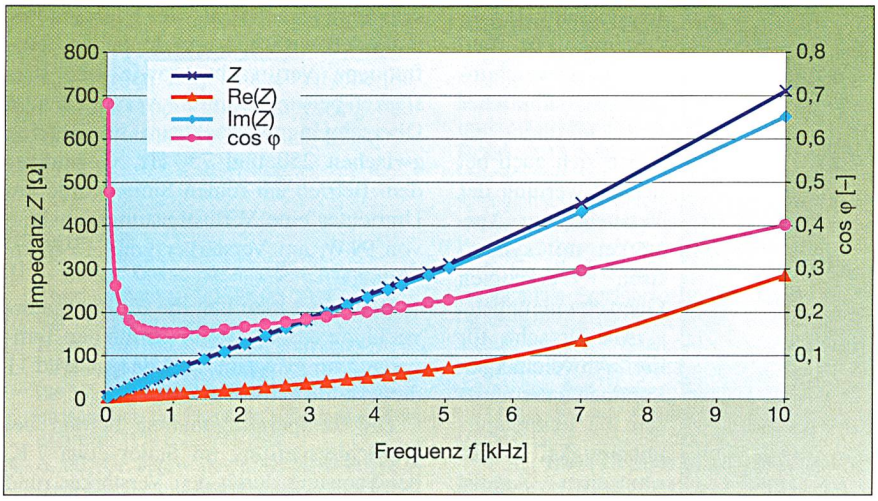


Bild 8 Messwerte für Impedanz und cos φ an einer 4-poligen Maschine der Baugrösse 132 S

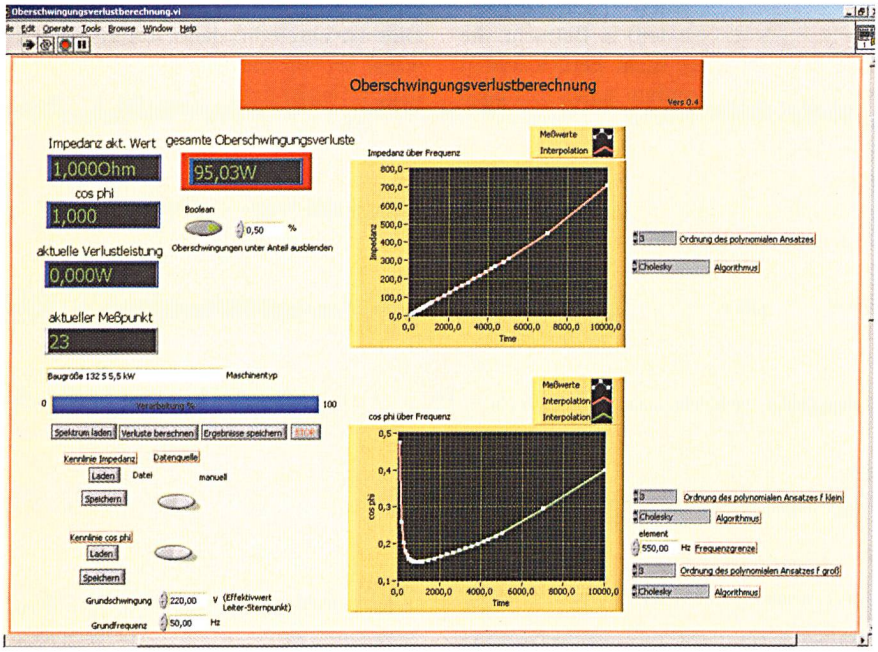


Bild 9 Screenshot Software zur Verlustberechnung

gigen induktiven und dem ebenfalls frequenzabhängigen ohmschen Anteil (Skineffekt) zusammen. Bei hohen Frequenzen (10 kHz und darüber) werden vermutlich auch kapazitive Effekte an Einfluss gewinnen, da jede Spule auch eine parallel geschaltete parasitäre Kapazität beinhaltet.

Um die durch eine Spannungsoberschwingung verursachte Verlustleistung aus der Formel 3 berechnen zu können, müssen Spannung, Strom sowie Phasenwinkel zwischen beiden bekannt sein. Wenn also ohmscher und induktiver Anteil der Impedanz bzw. Impedanz und Leistungsfaktor für eine gegebene Oberschwingungsfrequenz bekannt sind, lassen sich bei gegebener Amplitude und Frequenz der Spannungsharmonischen die verursachten Verluste berechnen.

Nicht betrachtet werden hierbei zunächst ein allfälliger Einfluss der Spannungsamplitude auf den induktiven Anteil (nichtlineare Effekte) sowie die Temperaturabhängigkeit des ohmschen Anteils (Widerstandserhöhung in Stator und Rotor).

Zur Bestimmung der frequenzabhängigen Grössen von Impedanz und Leistungsfaktor wurde der Rotor blockiert und der Stator dreiphasig mit kleiner Spannung variabler Frequenz gespeist (Bild 7).

Der Strom sowie der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung wurden mit dem Poweranalyser gemessen. Die Spannung wurde dabei zur Vermeidung der Beeinflussung durch die Kabelimpedanz direkt an den Maschinenklemmen gemessen. Der Abstand zweier Messpunkte betrug im Bereich 50 bis 1150 Hz 150 Hz. Darüber wurde die Schrittweite kontinuierlich auf 3 kHz vergrössert. Die Impedanz wurde für insgesamt 30 Frequenzwerte bis 10 kHz bestimmt. Es ergaben sich die in Bild 8 dargestellten Kurvenverläufe [6].

Der induktive Anteil steigt wie erwartet annähernd linear mit der Frequenz bis 10 kHz gemäss dem Zusammenhang $X = \omega \cdot L$ an. Der ohmsche Anteil steigt ausgehend vom Gleichstromwiderstand der Ständerwicklung von 1,7 Ω über rund 10 Ω bei 1 kHz auf 280 Ω bei 10 kHz an. Diese Zunahme erfolgt vermutlich auf Grund von Stromverdrängungseffekten. Die Eindringtiefe bei Kupfer berechnet sich aus Formel 5.

Bei 10 kHz beträgt sie beispielsweise nur rund 0,66 mm. Der cos φ fällt von 0,65 bei 25 Hz auf ein Minimum von 0,15 bei 950 Hz ab, um dann unter dem Einfluss des zunehmenden ohmschen Anteils auf 0,39 bei 10 kHz anzusteigen.

$$d = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \kappa \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot \pi)^2 \cdot 5{,}7 \cdot f}} \quad (5)$$

Interpolation

Um die Impedanz und den Leistungsfaktor für jede Frequenz zwischen 50 Hz und 10 kHz angeben zu können, müssen die Lücken zwischen zwei Messpunkten durch Interpolation geschlossen werden. Dazu wurde für die beide Kurven Z und cos φ in Bild 7 ein Polynom 3. Ordnung gemäss Formel 6 verwendet. Bei der Kurve für cos φ stellte es sich als geeignet heraus, den Bereich bis zum Minimum (etwa 0,6–0,9 kHz) sowie jenen nach dem Minimum durch Polynome mit unterschiedlichen Koeffizienten zu interpolieren. Die Koeffizienten werden dabei aus den gemessenen Stützstellen der Kurve berechnet [7].

$$y = a \cdot \chi^3 + b \cdot \chi^2 + c \cdot \chi + d \quad (6)$$

Für die Berechnung der Oberschwingungsverluste werden für jede Oberschwingung die Impedanz sowie der Phasenwinkel aus den extrapolierten Kurven entnommen. Die berechneten Werte werden dann über alle Oberschwingungen aufsummiert.

Zur Automatisierung der Berechnungen wurde ein Programm geschrieben, das die Kurveninterpolation sowie die anschliessende Verlustberechnung durch-

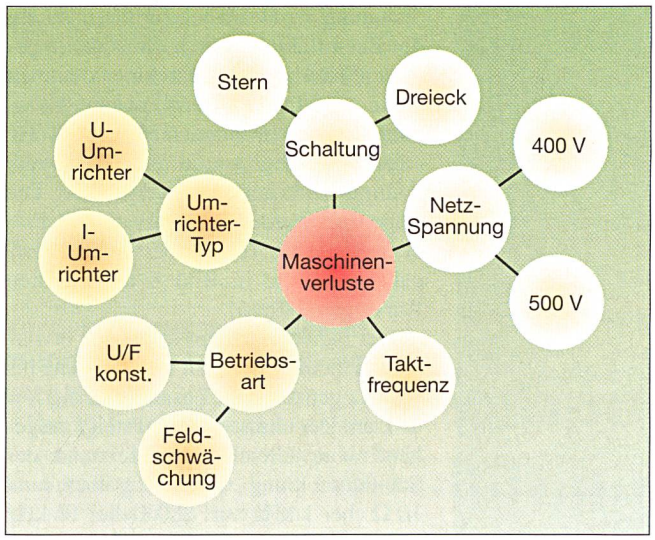


Bild 10 Einflussfaktoren auf die Maschinenverluste

führt (Bild 9). Als Eingabewerte werden die Kurvendaten für Impedanz und cos φ über der Frequenz, die Grundschwingungsfrequenz und -amplitude sowie das gemessene Oberschwingungsspektrum benötigt.

Überprüfung des Interpolationsansatzes

Zur Überprüfung der Brauchbarkeit dieses Ansatzes wurden die bei vorangegangenen Dauerlaufversuchen am Umrichter ermittelten Oberschwingungsspektren herangezogen und mit der bereits vorgestellten Software die zu erwartenden Oberschwingungsverluste berechnet und mit den real gemessenen Werten verglichen.

Dazu wurde der Betrieb bei Bemessungsmoment an einem Pulsumrichter mit 4 kHz Pulsfrequenz gewählt. Es ergaben sich gegenüber einer oberschwingungsfreien Speisung gemessene zusätzliche Verluste von rund 100 W (der vorausberechnete Wert betrug 90,2 W). Die Abweichung lag in diesem Fall bei rund 10%. Abweichungen in ähnlicher Grössenordnung ergaben sich auch bei der Auswertung der Versuche am Verstärker mit synthetisch erzeugten Oberschwingungen.

Als Ursache für die Abweichungen kommen unter anderem die Temperaturabhängigkeit des ohmschen Anteils sowie der Einfluss der Amplitude auf den induktiven Anteil (Nichtlinearitäten) in Betracht, die bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt worden sind. Ausserdem gehen hier auch die Messunsicherheiten der für die elektrische und mechanische Leistungsmessung verwendeten Geräte ein [8].

Da dieses Verfahren bisher nur bei wenigen Versuchen überprüft worden ist, muss der vorgeschlagene Ansatz im Rahmen zukünftiger Untersuchungen bei variablen Betriebsparametern des Umrichters aber auch an verschiedenen Maschinen und Umrichtertypen verifiziert sowie die Software um weitere Parameter – beispielsweise die Maschinentemperatur – ergänzt werden.

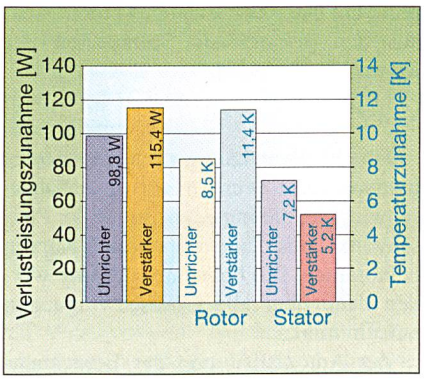


Bild 11 Verlustleistungs- und Temperaturzunahme in Ständer und Läufer bei Umrichter- und Verstärkerspeisung

Ausblick

Mit den hier vorgestellten Leistungsverstärkern ergeben sich interessante Möglichkeiten, die durch die in Bild 10 dargestellten Einflussfaktoren auf das Oberschwingungsspektrum an den Klemmen einer umrichtergespeisten Induktionsmaschine hervorgerufenen Wirkungsgradveränderungen quantitativ und unter reproduzierbaren Bedingungen zu untersuchen.

Das Verstärkersystem ermöglicht es, den Ort der Maschine mit dem grössten Anteil an den Oberschwingungsverlusten zu untersuchen. Es besteht die Vermutung, dass Oberschwingungen im Bereich von einigen kHz vorrangig zu zusätzlichen Eisenverlusten, im Bereich einiger hundert Hz hingegen vorrangig zu Verlusten durch Stromverdrängungseffekte im Bereich der Läuferstäbe führen.

Untermauert wird diese Vermutung durch den Vergleich von Temperaturmesswerten in Ständer und Läufer eines Induktionsmotors bei Speisung mit dem Pulsumrichter, der ja einen hohen Oberschwingungsanteil in der Grössenordnung der einfachen und doppelten Taktfrequenz verursacht, sowie bei Verstärkerspeisung mit vorgegebenem Oberschwingungsspektrum im Bereich zwischen 250 und 750 Hz. Gegenüber dem Betrieb am reinen Sinus wurde am Umrichter eine Verlustleistungszunahme von 99 W, am Verstärker von 115 W ermittelt.

Betrachtet man nun die für die Statorwicklung und den Rotor ermittelten Temperaturen, so ergibt sich das in Bild 11 dargestellte Bild.

Die Temperaturzunahme beträgt bei Umrichterspeisung im Stator etwa 7 K, bei Speisung durch den Verstärker rund 5 K. Im Rotor beträgt die Übertemperatur bei Umrichterspeisung 8,5 K, bei Verstärkerspeisung 11,4 K. Das Verhältnis Stator- zu Rotortemperatur kehrt sich um. Dies ist ein Indiz dafür, dass sich teilweise der Ort der erzeugten Verlustleistung verlagert hat.

Die Verstärker bieten nun eine Möglichkeit, diese Beobachtung näher zu untersuchen, indem die Maschine bei konstant gehaltener Verlustleistung mit Oberschwingungen im Bereich einiger hundert Hz und einiger kHz gespeist wird und die Temperaturerhöhungen von Ständer und Läufer miteinander verglichen werden. Aus den Ergebnissen werden sich dann auch vielversprechende Möglichkeiten zur Anpassung und Optimierung eines Modells zur Temperaturvorausberechnung der Maschine aufzeigen [9].

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass durch das Verstärkersystem viele neue und interessante Möglichkeiten für Grundsatzuntersuchungen bezüglich des Verhaltens von Induktionsmaschinen bei Speisung mit oberschwingungsbehafteten Spannungen eröffnet werden. Ausserdem können nun theoretische Modelle zur Vorausberechnung der durch den Umrichter verursachten zusätzlichen Verluste unter genau definierten Randbedingungen auf ihre Praxistauglichkeit überprüft und optimiert werden. Durch die Flexibilität des Systems können auch zukünftige Umrichtertypen nachgebildet werden.

Erstmalig ist es möglich, den Einfluss der Änderung einzelner Umrichterparameter auf die Maschinenerwärmung messtechnisch zu erfassen. Weiterhin wurde ein mögliches Verfahren zur Vorausberechnung der Maschinenverluste bei bekanntem Oberschwingungsspektrum des Umrichters vorgestellt. Zukünftig können die zusätzlichen Verluste

durch eine Messung des Spannungsspektrums an den Maschinenklemmen abgeschätzt werden. Dies ist auch an einer bereits in der Produktionsanlage eingebauten und in Betrieb befindlichen Maschine möglich.

Referenzen

[1] *K. Wolters:* Drehzahlveränderbare Antriebe mit Asynchronmotoren. VDE-Verlag, 1994.

[2] DIN – EN 50019 2000

[3] *H. Dreier, H. Stadler, U. Engel, H. Wickboldt:* PTB – Prüfregel für Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart «Erhöhte Sicherheit» Ex e, Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt 1978 ISSN 0341-7964

[4] *G. Müller, E. Bunzel:* Oberschwingungsverluste in Niederspannungs-Asynchronmaschinen, Teil I. Veröffentlichung in «Die Antriebstechnik», Jahr 2000, Heft 8.

[5] *G. Müller, E. Bunzel:* Oberschwingungsverluste in Niederspannungs-Asynchronmaschinen, Teil II: Analytische Untersuchungen. Veröffentlichung in «Die Antriebstechnik», Jahr 2000, Heft 9.

[6] Messungen der Oberschwingungen und des Impedanzspektrums. EW Rundschau, Elektrizitätswirtschaft 1994, Heft 20.

[7] *C. Geiger:* Numerische Mathematik für Studierende der Mathematik und der Technomathematik. Vorlesungsunterlagen Wintersemester 2000/2001, Fachbereich Mathematik der Universität Hamburg, Sommersemester 2001, http://home.arcor.de/jan_henrik/scripts/Num1kap-2in1.ps.gz

[8] *W. H. Heini Gränicher:* Messung beendet – was nun? Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und Auswertung von Messungen. Teubner-Verlag Stuttgart 1996.

[9] *T. Vetter:* Überwachung und Prädiktion des Erwärmungsverhaltens einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer mittels Parameterschätzung. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1988.

Weiterführende Literatur

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

J. Xie, D. Hasenkopf, R. Schmidt: Messung von Oberschwingungen extrem kleiner Amplituden. Veröffentlichung in «Elektrische Bahnen», Jahr 2001, Heft 6–7.

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.

Angaben zu den Autoren

Dipl. Ing. **Christian Lehrmann** ist seit 1999 Mitarbeiter im Laboratorium *Explosionsgeschützte Maschinen* im Fachbereich 3–4 (Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, Labor 3.43, D-38116 Braunschweig. Seit 2000 arbeitet er an einem Forschungsprojekt zur Untersuchung der Erwärmungen und Verluste umrichtergespeister Antriebe mit.
Kontakt: christian.lehrmann@ptb.de

Dr. Ing. **Ulrich Engel** ist seit 1965 Mitarbeiter im Laboratorium *Explosionsgeschützte Maschinen* im Fachbereich 3–4 (Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel) der Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Labor 3.43, D-38116 Braunschweig. 1972 promovierte er bei Prof. Jordan, TU Hannover und ist seit 1973 Leiter des Laboratoriums.
Kontakt:, ulrich.engel@ptb.de

Dr. Ing. **Frank Lienesch** ist seit 1994 Mitarbeiter im Laboratorium *Explosionsgeschützte Maschinen* im Fachbereich 3–4 (Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, Labor 3.43, D-38116 Braunschweig. 1999 promovierte er bei Prof. Kind, TU Braunschweig. Seit 2000 arbeitet er an einem Forschungsprojekt zur Untersuchung der Erwärmungen und Verluste umrichtergespeister Antriebe mit.
Kontakt: frank.lienesch@ptb.de

[1] Bei den Verstärkern handelt es sich um Linearverstärker mit einem Frequenzbereich von 0–10 kHz.

[2] Hier ist eine allgemeine Beschaltung des Verstärkers mit einer induktiven Last gemeint. Dies ist in dem hier betrachteten Fall die Induktivität der Maschine.

[3] Ganzzahlige Vielfache der Grundschwingungsfrequenz

[4] Tektronix TDS 540

[5] Lem-Norma D6100 Poweranalyser mit 100 kHz Bandbreite

[6] Der Ausdruck Nenndrehzahl ist in Deutschland nicht mehr erlaubt. Der richtige Ausdruck ist Bemessungsdrehzahl. Bei Strom, Spannung und Leistung gilt Gleiches. In der Schweiz ist der Begriff «Nenndrehzahl» jedoch noch gebräuchlich.

[7] Die auf dem Typenschild angegebene Bemessungsdrehzahl (Synchrondrehzahl 1500 U/min abzüglich der Schlupfdrehzahl) bei Bemessungsmoment.

Les pertes dans les machines à induction alimentées par onduleurs en fonction des paramètres d'exploitation

Simulation d'onduleurs réels par un système amplificateur linéaire destiné à saisir les pertes par harmoniques et l'échauffement

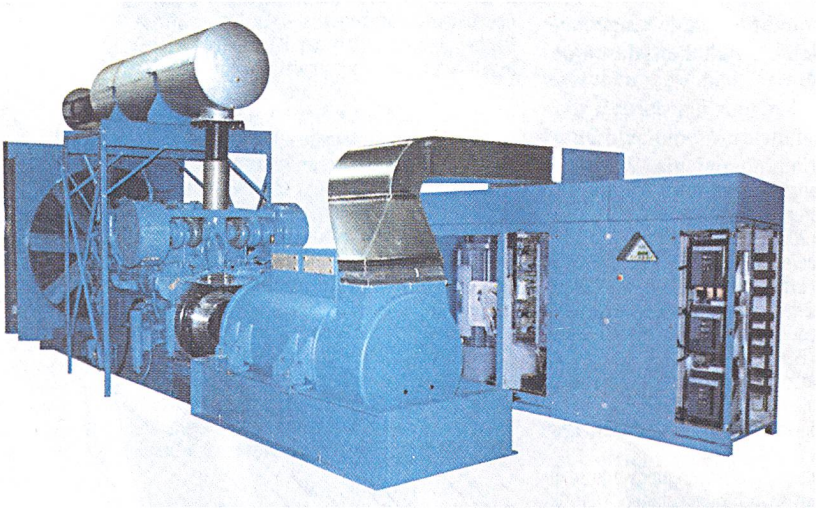
En raison de leurs nombreux avantages, les machines à induction alimentées par onduleurs sont de plus en plus utilisées dans les systèmes d'entraînement situés en environnement explosif [1]. Cependant, l'utilisation d'onduleurs provoque des pertes plus importantes et un échauffement accru par rapport à l'alimentation sur le réseau. Si la machine est réalisée en mode de protection «sécurité accrue», les surtempératures maximales des parties intérieures de la machine – par exemple à l'enroulement stator et à la cage d'écureuil – doivent être connues. Aussi faut-il actuellement tester ensemble la machine et l'onduleur pour le mode de protection précité. L'article présente la simulation d'onduleur par un système amplificateur de puissance triphasé à générateur de fonction arbitraire ainsi qu'une tentative de calcul préalable des pertes provoquées par les harmoniques présentes à la sortie de l'onduleur.

Was nützen teure Betriebsmittel wenn kein Strom vorhanden ist?

USV

Sicherheit für Ihre wichtigen Anwendungen

Statische oder dynamische Systeme mit oder ohne integriertem Diesel- oder Gas-Motor und Kurzzeit Energiespeicher(Powerbridge)



gebrüder meier ag
elektrische maschinen und anlagen

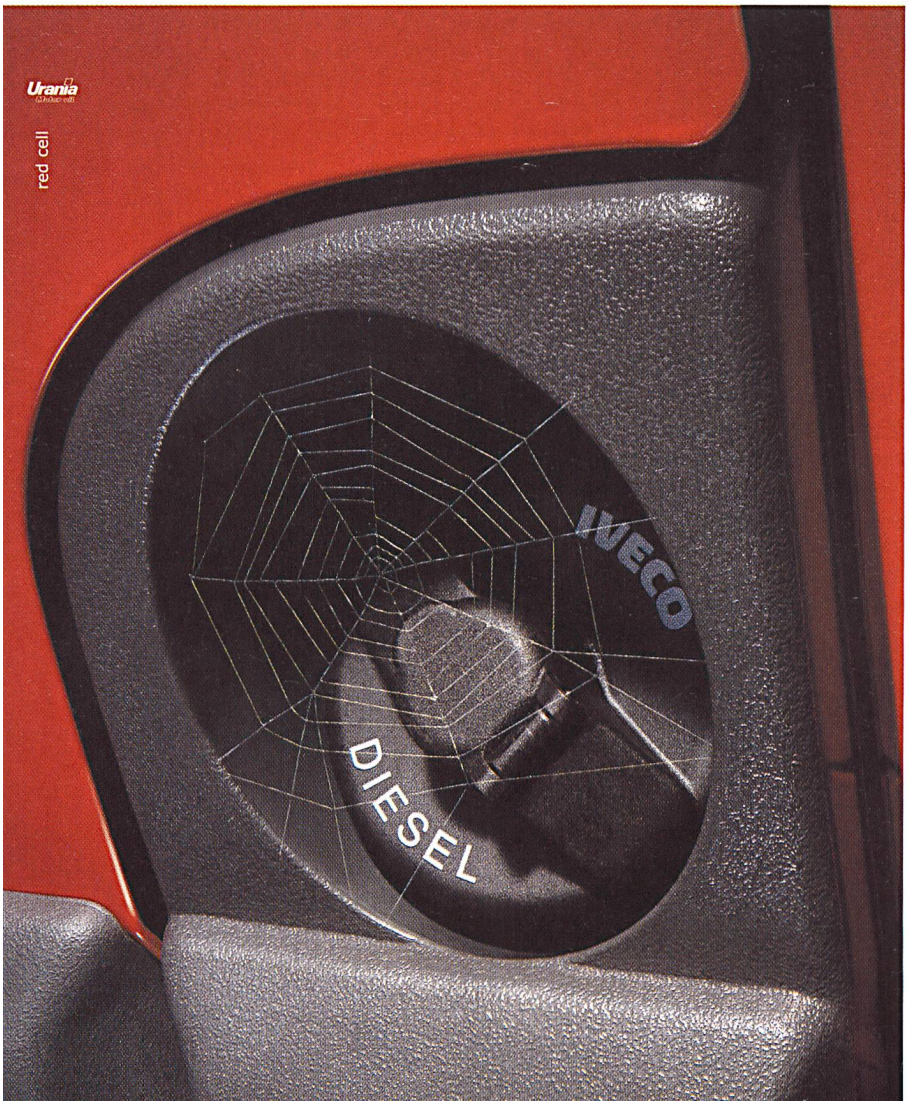
Leistungsbereich
statisch 3 - 4000 kVA
bei Parallelbetrieb
dynamisch 150 kVA - 40 MVA
bei Parallelbetrieb

Althardstrasse 190
8105 Regensdorf
Tel. 01 870 93 93
Fax 01 870 93 94

Buchsweg 2
3052 Zollikofen
Tel. 031 915 44 44
Fax 031 915 44 49

Bureau Suisse romande
2500 Bienne 6
Case postale 101
Tel/Fax. 032 342 48 63

Emmenweid
6021 Emmenbrücke
Tel. 041 209 60 60
Fax 041 209 60 40



Die neuen Unijet HPI 16 V-Motoren: mehr Leistung, weniger Verbrauch.

Daily unijet HPI

- Zwei Varianten: 70 kW (96 PS) und 85 kW (116 PS), mit Common-Rail-Einspritzung der zweiten Generation.
- Bis zu 10% weniger Treibstoff und bis zu 35% weniger Motoröl.
- Permanent hohe Drehmomente: 240 und 270 Nm für maximale Durchzugskraft und Beschleunigung.
- Mehr Fahrkomfort durch weniger Schaltvorgänge und hervorragende Elastizität.

Mehr Feuer, weniger Sprit.

www.iveco.com

IVECO