Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 23

Artikel: Einfluss der Wicklungsart auf die Erwärmung von Asynchronmotoren

Autor: Palit, Basanta B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903747

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: 11.07.2025

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

Einfluss der Wicklungsart auf die Erwärmung von Asynchronmotoren

Basanta B. Palit

Der Einfluss verschiedener Ständer- und Läuferwicklungen auf die Erwärmung von Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren wurde untersucht. Es wurde festgestellt, dass diese bei Dreieckschaltung höher ist als bei Sternschaltung, bei Umrichterspeisung höher als bei Netzspeisung und dass die Temperaturerhöhung von Doppelkäfigläufern grösser ist als von Einfachkäfigläufern. Es wird auch gezeigt, dass der Temperaturanstieg minimal wird, wenn der Wert der Speisespannung entsprechend der Frequenz optimal gewählt wird.

On a étudié l'influence de différents enroulements du stator et du rotor sur l'échauffement des moteurs asynchrones à cage. On a constaté que cet échauffement est plus élevé en triangle qu'en étoile, qu'il est également plus élevé dans le cas d'alimentation par convertisseur de fréquence que par réseau, et que l'augmentation de température des moteurs à double cage est plus élevée que celle des moteurs à simple cage. On montre de même que la croissance de la température devient minimale si la valeur de la tension d'alimentation est adaptée de manière optimale à la fréquence.

Adresse des Autors:
Dr. *Basanta B. Palit*,
Ingenieurschule beider Basel,
Abteilung Elektrotechnik, Gründenstrasse 40,
4132 Muttenz

Die Statorwicklung von Käfigläufer-Asynchronmotoren kann mit Einschicht- oder Zweischichtwicklung ausgeführt sein. Einschichtwicklungen haben in jeder Nut eine Spulenseite oder einen Leiter. Die gesamte Spulenzahl ist gleich der halben Nutenzahl. Bei Zweischichtwicklungen mit zwei Schichten je Nut ist demnach die Anzahl der Spulen gleich der Nutenzahl. Einschichtwicklungen werden heute hauptsächlich bei der Herstellung durch direktes Wickeln mit Hilfe von Automaten in halbgeschlossenen Nuten verwendet. Die Spulenköpfe liegen in zwei Ebenen, auch Etagen genannt. Zweischichtwicklungen können aus Spulen gleicher Weite oder aus konzentrischen Spulen unterschiedlicher Weite bestehen. Beträgt die Spulenweite eine Polteilung, so wird die Wicklung als Durchmesserwicklung bezeichnet. Ist die Spulenweite jedoch kleiner oder grösser als eine Polteilung, dann hat man es mit einer Sehnenwicklung zu tun. Bei gesehnten Wicklungen lassen sich die Leiterspannungen der beiden Spulenseiten einer Spule nicht mehr algebraisch addieren, da die beiden Spulenseiten nicht um eine Polteilung auseinander liegen. Durch Sehnung der Wicklung kann man einzelne, in der Feldkurve stark vertretene Oberwellen vollständig aussieben oder einige Oberwellen der Feldkurve gezielt stark unterdrücken.

Die Statorstränge können in Stern oder Dreieck geschaltet werden. Bei den heute meist stark gesättigten Motoren ist das Luftspaltfeld abgeflacht, enthält also insbesondere eine stark ausgeprägte dritte Harmonische. Diese läuft synchron mit der Grundwelle um und bewirkt innerhalb des Dreiecks kreisende Ausgleichströme von dreifacher Netzfrequenz, welche die von der Eisensättigung herrührenden Feldoberwellen zu unterdrücken trachten und die Wicklungsverluste erhöhen [1]. Die Dreieckschaltung des Ständers ist deshalb bei grösseren Leistungen und besonders bei Umrichterspeisung zu vermeiden. Die vom Sättigungsfeld mit dreifacher Polzahl stammenden Ausgleichströme erzeugen im Läufer die dreifache Schlupffrequenz.

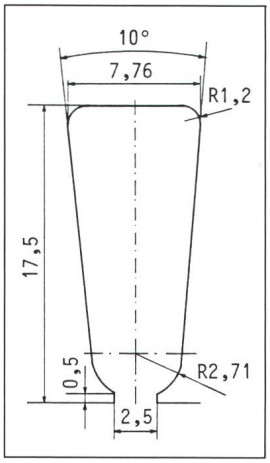
Die Läuferwicklung, die mit dem Netz nicht leitend verbunden ist, kann eine beliebige Strangzahl aufweisen. Wird die Läuferwicklung dauernd kurzgeschlossen, so ergibt sich eine äusserst einfache Bauart, die aus einem Stab je Nut besteht. Die Stäbe werden an beiden Enden durch Ringe direkt miteinander verbunden. Man spricht dann von einem Käfigläufer. Es werden Käfigwicklungen mit hohen schmalen Stäben, sogenannte Hochstabläufer, oder solche mit keilförmigen Stäben, sogenannte Keilstabläufer, gebaut. Ferner sind auch Doppel- und Mehrkäfiganker zur Verbesserung der Anlaufverhältnisse gebräuchlich.

Man kann die Asynchronmotoren aus dem Netz mit gegebener Frequenz speisen und dabei einen Betrieb mit praktisch konstanter Drehzahl erreichen. Mit Hilfe eines Frequenzumrichters können die Asynchronmotoren mit veränderlicher Spannung und Frequenz gespeist werden. Da die Ausgangsspannung von Umrichtern aus rechteckförmigen Pulsen besteht, ergeben sich bei Umrichterspeisung im Vergleich zur Netzspeisung grössere Verluste in den Asynchronmaschinen.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit war, das Betriebsverhalten von Asynchronmotoren und besonders deren Temperaturanstieg, bei Kombinationen von verschiedenen Ständern mit unterschiedlichen Läufern zu untersuchen.

Aufbau der Motoren

Es standen drei Asynchronmotoren gleicher Baugrösse zur Verfügung. Ständer und Läufer waren unter sich austauschbar und besassen verschiedene Ständerwicklungsarten und ver-



Figur 1 Ständernutform
Abmessungen in mm

schiedene Läuferkurzschlussstäbe. Somit konnten beliebige Ständer-Läufer-Kombinationen untersucht werden.

Alle Ständer waren mit einem PTC-Temperaturfühler, eingebettet im Wikkelkopf, gegen Überschreitung der zulässigen Grenztemperatur von 155 °C ausgerüstet. Beim Ansprechen stellte der Motor nicht ab, sondern es leuchtete nur eine Warnlampe auf. Die Lüftung der Motoren erfolgte durch einen Fremdlüfter, so dass die Fremdkühlung, unabhängig von den tiefen Drehzahlen bei niedriger Frequenz, immer konstant blieb.

Ständervarianten

Für die Versuche standen drei vierpolige, aber verschieden bewickelte Ständervarianten zur Verfügung. Das Statorgehäuse, das Lagerschild, der Klemmenkasten, der Bohrungsdurchmesser, das Ständereisen und die halbgeschlossene Nutform (Figur 1) waren bei allen Ständervarianten gleich.

Alle Motoren besassen folgende Nenndaten und ausgelegte Grössen:

- Nennleistung: 5,5 kW
- Nennspannung: 380 V
- Nennfrequenz: 50 Hz
- Nennmoment: 37 Nm
- Isolationsklasse: F (155 °C)
- Luftspaltlänge: 0,4 mm
- Statornutenzahl: 36
- Lochzahl: 3

Die drei Drehstrommotoren hatten folgende unterschiedliche Wickeldaten:

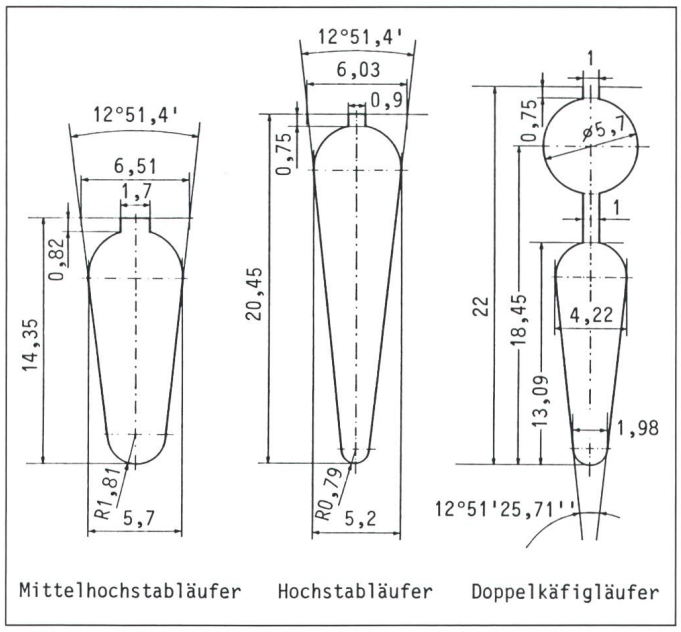
- Ständervariante S1: Einschichtwicklung in Dreieck, ungesehnt, Wickelschritt 1:10; Strangwiderstand bei 24 °C: 2,76 Ω.
- Ständervariante S2: Einschichtwicklung in Stern, ungesehnt, Wickelschritt 1:10; Strangwiderstand bei 24 °C: 0,921 Ω.
- Ständervariante S3: Zweischichtwicklung in Dreieck, gesehnt, Wikkelschritt 1:8; Strangwiderstand bei 24 °C: 3,16 Ω.

Läufervarianten

Es kamen folgende drei Läufervarianten (Figur 2) zur Anwendung:

- Läufervariante M: Mittelhochstabkäfig; Stabquerschnitt: 71,2 mm²
- Läufervariante H: Hochstabkäfig; Stabquerschnitt: 67 mm²
- Läufervariante D: Doppelkäfig; Stabquerschnitt: 67,5 mm²

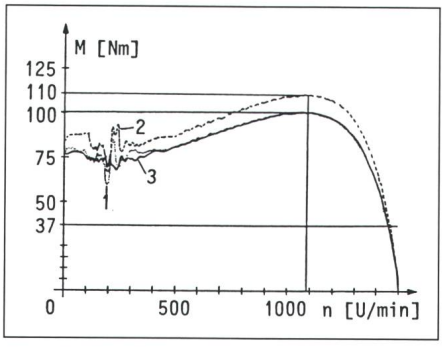
Bei der Dimensionierung der Querschnitte der Läuferstäbe wurde darauf geachtet, dass sich bei Vernachlässigung der Stromverdrängung praktisch gleiche Stromdichten ergaben. Die 28 Stäbe pro Läufer waren aus Aluminium. Die Läufernuten verliefen um ungefähr 6° schräg zur Wellenachse. An den Kurzschlussringen wurden kleine Ventilatorenflügel für einen zusätzlichen Konvektionswärmeaustausch angebracht.



Figur 2 Rotornutform
Abmessungen in mm

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien

Der netzgespeiste Asynchronmotor wurde mit einem Gleichstrommotor, dessen Drehmoment in Gegenrichtung zum asynchronen Drehmoment stand, von der Leerlaufdrehzahl bis zum Stillstand der Welle belastet. Für diesen Versuch wurde nur die Läufervariante M mit den drei Ständervarianten verwendet. Aus den Drehmoment-Drehzahlkennlinien (Figur 3)

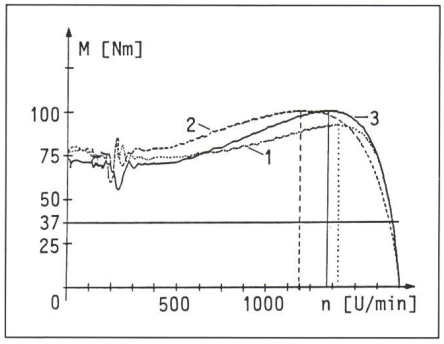


Figur 3 Einfluss der Ständerwicklung auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

M Drehmoment
n Rotordrehzahl
1 Ständer S1 mit Mittelhochstabläufer M
2 Ständer S2 mit Mittelhochstabläufer M
3 Ständer S3 mit Mittelhochstabläufer M

erkennt man, dass der sterngeschaltete Ständer, d.h. Variante S2, praktisch über den ganzen Drehzahlbereich das grösste Drehmoment erzeugt. Dieses Ergebnis kann auf die geringste Streuinduktivität von 4,77 mH der Kombination S2 mit M, gegenüber den Streuinduktivitäten von 14,97 mH und 14,84 mH der Kombination S1 mit M und S3 mit M zurückzuführen. Die beiden dreieckgeschalteten Ständer sind im Anzugsmoment und über einem Drehzahlbereich von null bis etwa 400 U/min kaum zu unterscheiden. Der Ständer S3 mit gesehnter Wicklung, welche die Raumoberwellen unterdrückt, wies im Bereich von 150...400 U/min den ruhigsten Drehmomentverlauf auf. Das grösste Kippmoment betrug 111 Nm.

Der Einfluss der Läufervarianten auf die Drehmoment-Drehzahlkennlinie bei unveränderter Ständervariante S1 ist aus Figur 4 ersichtlich. Ver-



Figur 4 Einfluss der Läuferwicklung auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

M Drehmoment
n Rotordrehzahl
1 Doppelkäfigläufer D mit Ständer S1
2 Mittelhochstabkäfigläufer M mit Ständer S1
3 Hochstabkäfigläufer H mit Ständer S1

gleicht man Figur 3 mit Figur 4, so lässt sich die Kombination der Ständervariante S2 mit der Rotorvariante M als die beste erkennen, sofern es um die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie geht.

Erwärmungsversuche im Netzbetrieb

Obwohl der Temperaturanstieg bekanntlich pauschal mit den Motorverlusten und somit mit dem Wirkungsgrad zusammenhängt, erfassen die vorliegenden Untersuchungen die quantitative Temperaturverteilung an drei Stellen der Motoren.

Indirekte thermische Messung

In erster Linie interessiert die Endtemperatur der Ständerwicklung, da bei Überhitzung die Wicklungsisolation Schaden nehmen könnte. Deshalb werden die verschiedenen Isolierstoffe nach ihrer Wärmebeständigkeit in Klassen eingeteilt, gemäss Empfehlung VDE 0,530, Teil 1, Anhang II.

Mit der sogenannten Widerstandsmethode kann die Temperatur einer Wicklung ermittelt werden. Die Methode beruht auf der Änderung des Widerstandes metallischer Leiter mit der Temperatur. Mit dem Index *w* für den warmen und *k* für den kalten Zustand der Wicklung folgt für die Temperatur im betriebswarmen Zustand:

$$T_2 = [(R_w - R_k) / R_k](T_o + T_k) + T_k$$

Dabei bedeuten:
R_k Widerstand der kalten Wicklung zu Beginn der Messung
R_w Widerstand der warmen Wicklung am Ende der Messung
T_k Temperatur der kalten Wicklung zu Beginn der Messung in °C
T_w Temperatur der warmen Wicklung am Ende der Messung in °C
T_o Materialabhängiger Parameter (Kupfer: $T_o = 235$ °C; Aluminium: $T_o = 245$ °C)

Die Widerstandsmessung erfolgte je nach Widerstandswert mit der Thomson- oder der Wheatstonebrücke. Das bedingte aber, dass der Läufer im Stillstand und die Klemmen spannungsfrei waren. Eine Messung im Ausschaltaugenblick war also nicht möglich. Deshalb wurde während der Abkühlung des Motors der Widerstand der Wicklung mehrmals in konstanten Zeitabschnitten gemessen und auf den Ausschaltzeitpunkt 0 extrapoliert.

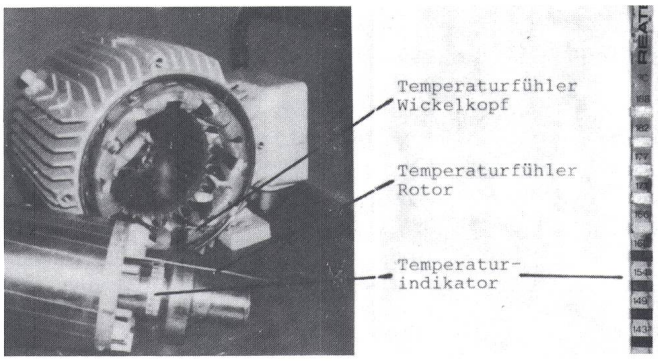
Direkte thermische Messung

In zweiter Linie interessierte auch die Rotortemperatur. Dazu wurden Temperaturmessstreifen (Indikatoren) verwendet, die diese durch Umschlagen der weissen Flächen auf schwarz beim Erreichen entsprechender Temperaturen anzeigten (Figur 5). Mit einer solchen Methode wurde die Temperatur der Lager und des Kurzschlussringes ermittelt. Die Probemessungen ergaben einen gleichen Temperaturanstieg für die beiden Kurzschlussringe. Aus diesem Grunde wurde die Temperatur von nur einem Kurzschlussring gemessen. Die Lagertemperatur wurde bei jenem Lager gemessen, das dem Lüfter zugewandt war. Dieses Lager wurde heisser als dasjenige auf der Kupplungsseite, da bei letzterem sehr viel Wärme durch die Wärmeleitung über die Kupplung verlorenging.

Zusätzlich zu den beiden oben erwähnten Messungen wurden Thermoelemente an verschiedenen Stellen des Motors, z. B. an Ständerwickelkopf, Motorgehäuse und Läufer (durch ein Loch im Kurzschlussring) angebracht und auf einen Schreiber geführt. Die Läufertemperatur konnte erst nach Abschalten des Motors und Stillstand des Läufers gemessen und auf den Abschaltzeitpunkt extrapoliert werden. Die Messungen mit den Thermoelementen waren aus zwei Gründen vorteilhaft: Erstens erhielt man zu den Messungen mit der Widerstandsmethode und mit den Indikatoren eine Redundanz, konnte also damit diese Messungen grob kontrollieren, und zweitens sah man, wie sich der Motor zeitlich erwärmte, wann er seine Endtemperatur erreichte, und wie er sich wieder zeitlich abkühlte. Anhand des zeitlichen Temperaturverlaufs des Ständerwickelkopfes wurde die Endtemperatur des Motors beurteilt. Dabei wurde angenommen, dass der Motor die Endtemperatur dann erreicht hatte, wenn die Temperaturänderung innerhalb einer halben Stunde weniger als 1 °C betrug.

Erwärmungsversuche

Bei Netzbetrieb wurden die Erwärmungsversuche zuerst nur mit der Läufervariante M und allen Ständervarianten durchgeführt. Der Motor wurde jeweils bei Nennspannung und Nennfrequenz mit dem Nennmoment 37 Nm belastet. Die Temperaturen der Ständerwicklung, des Kurzschlussringes und des Lagers wurden jeweils am Anfang und am Ende des Versuches, d. h. nachdem die Temperatur den stationären Endwert erreicht hatte, ermittelt. Anschliessend wurden die Erwärmungsversuche mit der thermisch besten Ständervariante und den übrigen Läufervarianten H und D weitergeführt. Ausser den Temperaturen wurden noch folgende Grössen in warmem Zustand der Motoren, d.h. nach Erreichen der stationären Endtemperatur, gemessen: der Zuleitungsstrom zum Motor, die vom Motor aufgenommene Wirkleistung (Zweiwattmetermethode), das Wellendrehmoment und die Läuferdrehzahl. Aus dem Wellendrehmoment und der Läuferzahl



Figur 5 Temperaturmessung in Ständer und Läufer

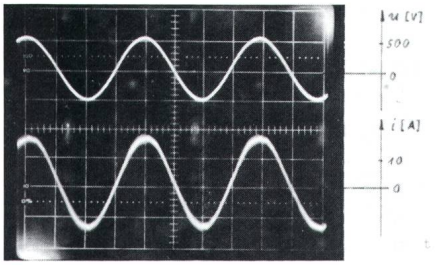
Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdreh-zahl	Temperaturanstieg			Ständerstrom	Leistungsauf-nahme	Wirkungs-grad
			Ständerwicklung	Kurzschlussring	Lager			
		[U/min]	[°C]	[°C]	[°C]	[A]	[W]	[%]
S1	M	1432	64	82	66	10,95	6090	91,1
S1	M	1436	60	76	58	11,00	6060	91,8
S3	M	1430	62	80	64	10,80	6075	91,2
S2	H	1438	63	81	63	11,60	6338	90,4
S2	D	1434	68	84	67	12,00	6480	85,7

Tabelle I Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei direkter Netzspeisung
Betrieb mit Nennspannung und Nennfrequenz
Ständerspeisespannung und -frequenz: 3 × 380 V, 50Hz
Wellenmoment: 37 Nm

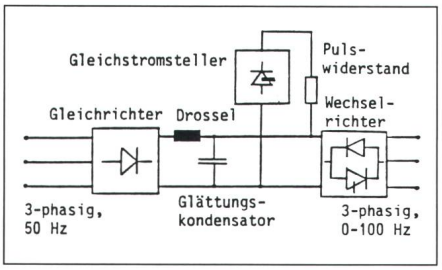
konnte die vom Motor abgegebene Wellenleistung und somit der Wirkungsgrad des Motors ermittelt werden. In Tabelle I sind die Messergebnisse zusammengestellt.

Die Temperaturwerte zeigen, dass S2 mit M, d.h. der sterngeschaltete Ständer mit dem Mittelhochstabläufer, die in thermischer Hinsicht und auch wirkungsgradmässig beste Ständer-Läufer-Kombination ist. Das Oszillogramm der verketteten Ständerspannung und des Ständerstromes dieser Ständer-Läufer-Kombination ist in Figur 6 zu sehen. Spannung und Strom sind praktisch sinusförmig.

Der ungesehnte, dreieckgeschaltete Ständer (d.h. Variante S1), kombiniert mit M, ist nur wenig schlechter. Die Mehrerwärmung gegenüber Variante S2/M kann auf die in den Ständersträngen zirkulierenden harmonischen Ströme 3. Ordnung (37,5% des grundharmonischen Stromes) und deren Einfluss auf den Läufer zurückgeführt werden. Die gesehnte Ständerwicklung (d.h. Variante S3), kombiniert mit M, wäre vom thermischen Verhalten her aufgrund der Sehnung besser als die ungesehnte Wicklung S1. Die grösseren Erwärmungen stammen in diesem Fall einerseits von den harmonischen Strömen 3. und 15. Ordnung



Figur 6 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Netzbetrieb
u verkettete Motorspannung, 50Hz
i Motorstrom
Kombination S2 mit M



Figur 7 Schaltbild des Frequenzumrichter-Leistungsteils

(33% und 29% des grundharmonischen Stromes) und anderseits von den grösseren Eisenverlusten, die bei dieser Ständervariante schon bei den Leerlaufversuchen festgestellt wurden. Die Fourieranalyse des Ständerstromes wurde mit einem Frequenzanalysator der Firma General Radio Company durchgeführt.

Die Kombination der verschiedenen Läufer mit dem sterngeschalteten Ständer S2 zeigte, dass die Temperatur umso stärker anstieg, je mehr die Stromverdrängung im Läufer zunahm. Somit war der Mittelhochstabläufer M der beste, der Hochstabläufer der zweitbeste und der Doppelkäfigläufer D der schlechteste hinsichtlich des Temperaturanstiegs. Die Temperaturerhöhungen im Kurzschlussring unterschieden sich mit ungefähr 8 °C jedoch nicht stark, und ihr Einfluss auf den Ständer war gering. Zwischen der Temperatur des Kurzschlussringes und der Temperatur des Lagers war ein Temperaturgefälle von 16...18 °C zu beobachten.

Für die Isolationsklasse F ist eine maximale Wicklungstemperatur von 155 °C zugelassen. Rechnet man mit einer maximalen Kühlmitteltemperatur von 40 °C, dann darf die maximale Temperaturdifferenz ΔT= 115 °C betragen. Somit waren die hier untersuchten Ständer-Läufer-Kombinationen alle auf der sicheren Seite, da keine eine Temperaturdifferenz von mehr als 82 °C erreichte. Zusammenfassend kann für den Netzbetrieb gesagt werden, dass mit Ausnahme der Ständerwicklung S3, in Kombination mit M, die Temperaturunterschiede von 3...9 °C bei den übrigen Kombinationen nicht auffallend gross waren.

Erwärmungsversuche im Umrichterbetrieb

Der verwendete Frequenzumrichter

Der für die Versuche verwendete Pulsumrichter besitzt, gemäss den Angaben der Herstellerfirma, die folgenden wichtigen Kenndaten:

- Umrichterart: Spannungsumrichter
- Eingangsspannung: 3×380 V
- Ausgangsspannung: 3×0...380 V
- Ausgangsfrequenz: 0...100 Hz
- Nennleistung: 25 kVA
- Ausgangsseitiger Nennstrom: 40 A
- Strombegrenzung: 60 A
- Wirkungsgrad: ≧95%

Der Umrichter arbeitet mit einer konstanten Zwischenkreisspannung (Figur 7). Die eingangsseitige Drehspannung wird in einer sechspulsigen Brückenschaltung gleichgerichtet. Der Gleichstromteil besitzt eine Glättungsdrossel und einen Glättungskondensator für die Spannungsglättung. Eine Rücklieferung elektrischer Energie in das 50-Hz-Drehstromnetz ist bei dem Umrichter nicht möglich. Die zu rekuperierende Energie, wie sie etwa beim Abbremsen von Motoren mit grossen Schwungmassen auftritt, wird hier in einem gesteuerten Pulswiderstand (Figur 7) in thermische Energie umgewandelt. Die Wechselrichtung erfolgt mit Hilfe eines selbstgeführten Wechselrichters, dessen Konzept für eine Phase aus Figur 8 ersichtlich ist. Der Wechselrichter arbeitet nach dem Prinzip der Pulsbreitenmodulation (PWM).

Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdreh-zahl [U/min]	Temperaturanstieg Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]	Netzseitiger Strom [A]	Leistungsauf-nahme [W]	Gesamt-verluste
S1	M	1414	91	114	90	12,0	6510	1031
S2	M	1420	87	108	80	12,0	6450	948
S3	M	1408	112	114	86	11,6	6525	1070
S2	H	1422	87	108	80	12,3	6600	1090
S2	D	1415	96	119	92	12,5	6750	1267

Tabelle II Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei direkter Umrichterspeisung mit 50 Hz
Betrieb mit Nennspannung und Nennfrequenz
Ständerspeisespannung: 3 × 380 V
Wellenmoment: 37 Nm

Erwärmungsversuche bei 50 Hz

Die Erwärmungsversuche wurden zuerst bei 50 Hz durchgeführt. Bei Umrichterbetrieb wurden die Wirkleistung und der Zuleitungsstrom vor dem Umrichter gemessen. Die Resultate sind in Tabelle II zusammengestellt.

Die Gesamtverluste in dieser Tabelle stellen die Summe der Verluste im Umrichter und im Motor dar. Bei 50-Hz-Umrichterbetrieb erwies sich der sterngeschaltete Ständer S2 mit dem Mittelhochstabläufer M als die verlustärmste Kombination. Thermisch waren die Kombinationen S2 mit M und S2 mit H sowohl gleichwertig als auch am besten.

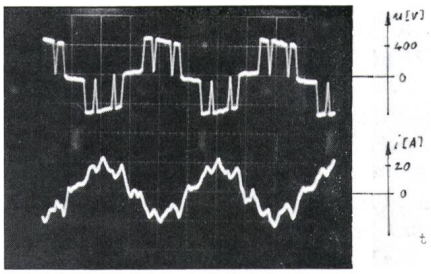
Ein Vergleich mit den Ständererwärmungen bei Netzbetrieb zeigte, dass alle Ständer beim Umrichterbetrieb im Mittel etwa 27 °C wärmer wurden. Dies ist auf den Oberschwingungsgehalt des Motorstromes mit ansehnlichem Anteil an Komponenten der 5., 7., 11., 19. usw. Ordnung zurückzuführen (Figur 9). Diese Stromoberschwingungen rufen im Läufer Pendelmomente und zusätzliche Verluste hervor. Die Läufertemperaturen waren beim Umrichterbetrieb um etwa 32 °C höher als beim Netzbetrieb, d.h., die Temperaturdifferenz zwischen Netz- und Umrichterbetrieb war hier noch grösser als bei den Ständern. Einerseits ist dies der grösseren Stromverdrängung durch die Oberschwingungsströme im Läufer und anderseits dem grösseren Schlupf beim untersuchten Umrichterbetrieb zuzuschreiben. Als thermisch beste Läufer erwiesen sich die Varianten M und H mit einem Temperaturanstieg von je 108 °C. Die Lagertemperaturen waren beim Umrichterbetrieb um etwa 22 °C höher als beim Netzbetrieb. Die Läufertemperaturen waren rund 27 °C höher als die Lagertemperaturen. Der Ständer blieb durchschnittlich um etwa 21 °C kühler als der Läufer.

Beim Umrichterbetrieb führten alle Ständer-Läufer-Kombinationen zu höheren Temperaturen als beim Netzbetrieb mit unveränderter Rangfolge. Bei den hier untersuchten Varianten musste keine Drehmomentreduktion vorgenommen werden, da die höchstzulässige Erwärmung von 115 °C bei maximaler Lufttemperatur von 40 °C nie überschritten wurde.

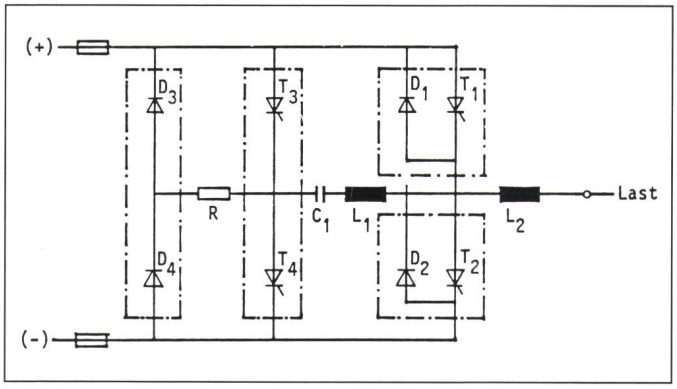
Erwärmungsversuche bei 5 Hz

Die *U-f*-Kennlinie des Umrichters, d. h. die Festlegung der Ausgangsspannung entsprechend der Ausgangsfrequenz des Umrichters, wurde so eingestellt, dass die Nennschlupfdrehzahl bei 5 Hz gleich gross wie bei den 50-Hz-Umrichterversuchen war. Damit wurde die Bedingung der konstanten Ständerflussverkettung erfüllt. Dies führte zu einer Ausgangsspannung des Umrichters von 3×58 V, anstatt 3×38 V wie im Falle einer linearen *U-f*-Kennlinie. Gegenüber letzteren wurde die Ständerspannung also um 52,63% erhöht. Tabelle III zeigt die Messergebnisse. Die Erwärmungen der Ständer lagen durchwegs unter denen der 50-Hz-Messung. Bei der Ständervariante S3 konnte der Erwärmungsversuch nicht durchgeführt werden, da die Motordrehzahl mit zunehmender Erwärmung bis zum Stillstand abnahm und der Motor das Drehmoment von 37 Nm nicht mehr aufbringen konnte. Der dreieckgeschaltete Ständer S1 mit dem Läufer M wurde ebenfalls ziemlich warm. Der Läufer zeigte einen starken Schlupf, und die Gesamtverluste waren am grössten.

Die geringere Erwärmung der übrigen Kombinationen gegenüber den 50-Hz-Messungen war auf die geringeren Eisen- und Zusatzverluste, bedingt durch niedrigere Spannung und Frequenz, zurückzuführen. Hier erwies sich die Kombination der Ständer-



Figur 9 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Umrichterbetrieb mit 50 Hz
u verkettete Motorspannung
i Motorstrom
Kombination S2 mit M



Figur 8
Aufbau einer Wechselrichterphase mit Kommutierungseinheit

T_1, T_2	Hauptthyristoren
T_3, T_4	Löschthyristoren
C_1, L_1	Umschwingkreis
D_1, D_2	Dioden
L_2	Glättungsdrossel

Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdreh-zahl	Temperaturanstieg			Netzseitiger Strom	Leistungsauf-nahme	Gesamt-verluste
		[U/min]	Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]	[A]	[W]	
S1	M	37	90	125	86	3,9	1695	1552
S2	M	83	67	86	64	3,5	1500	1178
S3	M							
S2	H	89	61	80	64	3,6	1545	1200
S2	D	75	73	91	64	3,7	1605	1314

Tabelle III Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei Umrichterspeisung mit 5 Hz
Ständerspeisespannung: 3 × 58 V
Wellenmoment: 37 Nm
Bei Kombination S3/M fiel die Motordrehzahl bei zunehmender Erwärmung sehr stark bis zum Stillstand ab. Der Versuch wurde abgebrochen.

variante S2 mit dem Läufer H als die beste, dicht gefolgt von jener mit dem Läufer M. Das Oszillogramm der verketteten Ständerspannung und des Ständerstromes der letzgenannten Läufervariante mit S2 ist in Figur 10 ersichtlich. Der Ständerstrom weist Oberschwingungesanteile der 2., 5., 7., 8., 12., 100., 210., 306., 412. usw. Ordnung auf. Gegenüber den Läufern waren die Ständer etwa 18...35 °C und die Lager 16...39 °C kühler.

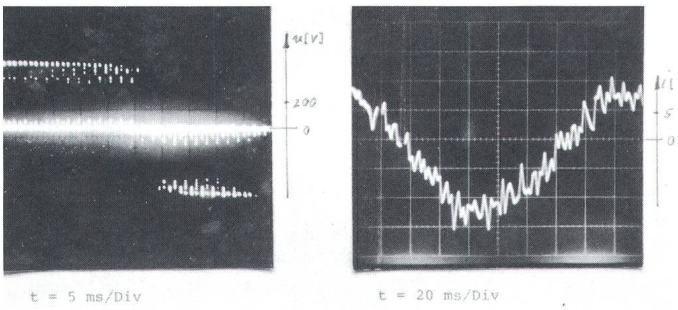
Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die dreieckgeschalteten Ständer S1 und S3 thermisch sehr stark bis zum Betriebsversagen beansprucht wurden. In diesen beiden Fällen war vermutlich die eingestellte Ständerspannung für das gegebene Lastmoment nicht optimal. Der Begriff «optimale Spannung» wird in einem späteren Abschnitt erläutert.

Erwärmungsversuche bei 16 Hz

Um den Einfluss der *U-f*-Kennlinie auf die Erwärmung der Motoren abzuklären, wurden Erwärmungsversuche auch mit 16 Hz durchgeführt. Das Kriterium für die Einstellung der *U-f*-Kennlinie wurde dieses Mal so festgelegt, dass der Motor bei 16 Hz genau so viel Leerlaufstrom bezog wie bei Nennspannung und Nennfrequenz. Dies führte zu einer Ausgangsspannung des Umrichters von 3×125 V, anstatt 3×121,6 V wie bei Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen Ausgangsspannung und -frequenz des Umrichters. Bezogen auf eine lineare Kennlinie, wurde also die Ständerspannung nur um 2,8% erhöht, womit die Konstanz der Ständerflussverkettung bereits nicht mehr gewährleistet war. In Tabelle IV sind die Messergebnisse zusammengestellt.

Bei der Kombination S3 mit M sprach 25 Minuten nach Versuchsbeginn der PTC-Widerstand bei noch sehr steilem Temperaturanstieg an. Der Versuch wurde abgebrochen, damit der Motor nicht Schaden nehmen konnte. Die Tabellenwerte sind somit Messwerte bei Versuchsabbruch. Die Messungen zeigten eine durchwegs grössere Erwärmung als bei 50 Hz. Der grosse Schlupf führte zu sehr starker Erwärmung im Läufer. Auch der Ständer erwärmte sich einerseits durch die Strahlungswärme vom Läufer her, und anderseits führte der höhere Ständerstrom zu zusätzlichen Erwärmungen.

Es zeigte sich auch hier, dass Varianten mit sterngeschaltetem Ständer, also mit S2, thermisch die besten waren. als thermisch idealer Läufer erwies sich auch hier der Mittelhochstabläufer M. Der Verlauf der verketteten Ständerspannung und des Ständer-



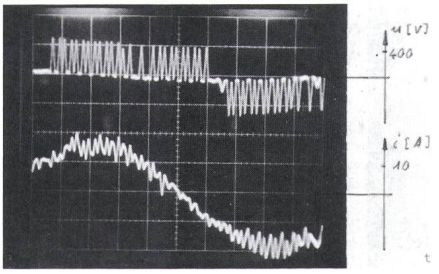
Figur 10
Oszillogramm von Spannung und Strom bei Umrichterbetrieb mit 5 Hz

u verkettete Motorspannung
i Motorstrom in A, Kombination S2 mit M

Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdreh-zahl	Temperaturanstieg			Netzseitiger Strom	Aufnahme-leistung	Gesamt-verluste
		[U/min]	Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]	[A]	[W]	
S1	M	351	105	141	91	6,6	3000	1640
S2	M	376	89	113	79	6,4	2995	1538
S3	M	388	127	108	69	PTC	spricht	an
S2	H	355	110	141	92	6,9	3240	1865
S2	D	340	115	147	97	7,1	3360	2043
					PTC	spricht	an	

Tabelle IV Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei Umrichterspeisung mit 16 Hz
Ständerspeisespannung: 3 × 125 V
Wellenmoment: 37 Nm

stromes der Kombination S2 mit M kann der Figur 11 entnommen werden. Die Frequenzanalyse des Ständerstromes zeigte Oberschwingungsanteile erst ab der Ordnungszahl 27. Die Läufer wurden etwa 31 °C wärmer als die Ständer. Das Temperaturgefälle vom Kurzschlussring zum Lager betrug rund 45 °C. Einzig die ideale Ständer-Läufer-Kombination lag noch deutlich unter dem maximalen Temperaturanstieg von 115 °C. Alle anderen Kombinationen waren sehr nahe daran oder überschritten diese Grenze sogar.



Figur 11 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Umrichterbetrieb mit 16 Hz

u verkettete Motorspannung
i Motorstrom
Kombination S2 mit M

Um auch bei 16 Hz Speisefrequenz eine Messung zu bekommen, die mit denen bei 50 und 5 Hz verglichen werden konnte, wurde die Ständerspannung so weit erhöht, dass die Nennschlupfdrehzahl wieder gleich gross war wie bei 50 Hz. Dazu musste die Spannung von 125 V auf 138 V erhöht werden. Die Versuche wurden nur mit S2 und M durchgeführt. Die Messung zeigte, dass die Erwärmung jetzt wesentlich geringer war als vorher. Die Temperaturänderung der Ständerwicklung lag nur noch bei 74 °C gegenüber 114 °C bei 125 V. Dadurch wurde bestätigt, was auch schon die 5-Hz-Messung gezeigt hatte, dass nämlich die Motor-Endtemperatur mit abnehmender Frequenz ebenfalls absinkt.

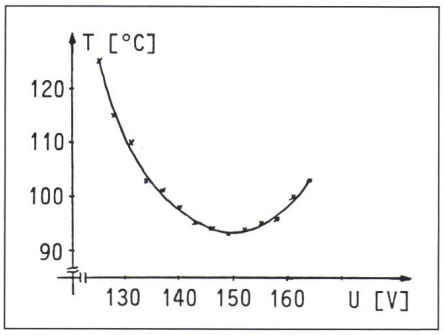
Optimierung der Speisespannung

Im vorhergehenden Abschnitt hat man gesehen, dass eine falsche Speisespannung den Motor sehr stark erwärmen kann. Deshalb ist es wichtig, dass die Spannung nach einer optimalen *U-f*-Kennlinie eingestellt wird. Um dieses Optimum durch Erwärmungsversuche zu ermitteln, muss bei gegebener Frequenz jene Spannung gesucht werden, bei welcher der Motor die geringste Enderwärmung erreicht.

Zur Bestimmung der optimalen Spannung bei 16 Hz wurden Versuche am Motor mit S2 und M, ausgehend von 125 V, begonnen und die Temperaturen auf die Endwerte gebracht. Anschliessend wurde die Speisespannung in Schritten von je 3 V erhöht und dabei jeweils die Endtemperatur des Ständerwickelkopfes (nicht zu verwechseln mit den in den Tabellen I...IV erwähnten Ständerwicklungen) untersucht. Die Messung zeigte, dass die Temperatur bei 149 V, d.h. bei einer Spannung, die 22,6% höher als die frequenzproportionale Spannung lag, ihr Minimum von 93 °C erreichte (Figur 12). Bei Spannungen grösser oder kleiner als 149 V stieg die Temperatur stärker an.

Schlussbemerkungen

Einschichtwicklungen können einfacher und kostengünstiger hergestellt werden als Zweischichtwicklungen. Einschichtwicklungen sind daher für kleinere Asynchronmaschinen vorzuziehen. In thermischer Hinsicht ist die Sternschaltung der drei Ständerstränge der Dreiecksschaltung überlegen, da bei der ersteren kein Nullstrom fliessen kann. Bei Dreieckschaltung können hauptsächlich Oberschwingungsströme der 3. und anderer ungeradzahliger Ordnungen mit entsprechend höherer Frequenz innerhalb der Wicklung kreisen. Diese Ströme entstehen durch das Luftspaltfeld, dessen Gestalt durch die ungleichmässige Eisensättigung, durch den nicht immer konstanten Luftspalt und schliesslich durch die asymmetrische Speisung der Wicklungen hervorgerufen wird. Der letzte Fall kann z.B. auch bei einer Umrichterspeisung auftreten, bei welcher die Zündzeitpunkte der Thyristoren Asymmetrien aufweisen.



Figur 12 Temperatur in Abhängigkeit der angelegten Ständerstrangspannung bei 16 Hz

U Ständerstrangspannung
T Endtemperatur des Ständerwickelkopfes

Der Ständer mit der ungesehnten Einschichtwicklung in Stern, kombiniert mit dem Mittelhochstabläufer, wies sowohl das grösste Kipp- als auch das grösste Anlaufmoment auf. Bei dieser Kombination von Ständer und Läufer ergaben die Erwärmungsversuche auch die tiefsten Verluste und den niedrigsten Temperaturanstieg des Motors. Dieses Ergebnis wurde sowohl durch die Messungen bei Netz-, als auch durch die Messungen bei Umrichterspeisung bestätigt. Der Temperaturanstieg bei Netzspeisung ist unproblematisch. Bei Umrichterspeisung sind die Motortemperaturen generell höher als bei Netzspeisung.

Bei höheren Frequenzen ist der Mittelhochstabläufer temperaturmässig etwas besser als der Hochstabläufer. Bei niedrigeren Frequenzen kann es umgekehrt sein, sofern die Speisespannung entsprechend der Bedingung der Flusskonstanz gewählt wird. Bei tiefen Frequenzen ist der Temperaturanstieg der Motoren von der Höhe der angelegten Spannung abhängig. Es gibt eine optimale Spannungshöhe, bei welcher der Temperaturanstieg minimal wird. Eine Abweichung von dieser optimalen Spannung führt zu einer stärkeren Erwärmung der Motoren.

Von den drei untersuchten Läuferarten erwärmt sich der Doppelstabläufer am stärksten. Dies ist auf die Oberschwingungseinflüsse im Läuferstab wegen seiner schmäleren und höheren Bauform zurückzuführen.

Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass zur Verhinderung von unzulässigen Erwärmungen bei industriellen Antrieben einerseits der richtige Ständer mit dem richtigen Läufer kombiniert und anderseits die Spannung des Frequenzumrichters optimal eingestellt werden muss.

Die Untersuchungen wurden an der Ingenieurschule beider Basel, Muttenz, im Rahmen eines Industrieauftrages durchgeführt.

Literatur

[1] *H. Jordan, V. Klima* und *K. P. Kovács:* Asynchronmaschinen: Funktionen, Theorie, Technisches. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1975.

Transformateur isolé à la résine pour montage sur poteau

Degré de protection IP 34 dans coffret en Alu.

MAYLAMID®

Giessharz-Transformator für Mastaufstellung

Schutzart IP 34 in Alu.-Gehäuse

100 ANS JAHRE YEARS GARDY 1890 - 1990

RESPECTE L'ENVIRONNEMENT

UMWELTFREUNDLICH

APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE HAUTE ET BASSE TENSION

ELEKTRISCHE APPARATE FÜR HOCH- UND NIEDERSPANNUNG

GARDY

GARDY S.A.
C.P. 230
15, rue Marziano
CH-1211 GENÈVE 24

Tel. 022/43 54 00
Telex. 422 067
Telegr. YDRAG-GENÈVE
Fax. 022/43 95 48