

Richtige Verdichterüberwachung sichert Zuverlässigkeit

Der Antriebsmotor im Kältekreislauf

Ulrich Adolph, Leipzig, und Marc Woerner, Forchtenberg

Im Kältekreislauf mit hermetischem oder halbhermetischem Verdichter befindet sich der jeweilige Verdichter-Antriebsmotor in der Kältemittel-Öl-Atmosphäre des umlaufenden Kältemittelstromes und ist mit der darin enthaltenen Restfeuchtigkeit und den Restverschmutzungen umfangreichen chemischen Belastungen ausgesetzt. Der Motor mit seinen Kupfer- bzw. Aluminiumwicklungen und den in verschiedenen Schichten aufgebrachten Isolierstoffen liefert dabei selbst einen entscheidenden Beitrag zu den chemisch-thermischen und mechanischen Reaktionen, der umso stärker wird, je höher die Betriebstemperatur des Motors wird.

Der Motor liefert damit eine der Einsatzgrenzen des Verdichters unter Berücksichtigung der Einsatzparameter, vorrangig der Motortemperatur. Seit etwa 1970 gibt es moderne und verbesserte Alternativen, als die in der Vergangenheit realisierte Stromüberwachung von Kältekompresoren.

Die Motortemperatur

In KK 5/2005 (S. 28–36) wurde über die Einsatzgrenzen von Kältemittelverdichtern berichtet¹. Hier sollen nun die speziellen Probleme bei Einbaumotoren näher betrachtet werden.

Die **Motorgrenze** im Einsatzgrenzendiagramm wird durch die maximal **zulässige Motortemperatur** bestimmt. Sie trifft für halbhermetische und hermetische Verdichter zu, bei denen der Motor integrierter Bestandteil des Verdichters ist. Je nach Isolationssystem liegen die zulässigen Werte zwischen 90°C und 120°C, wobei dieser Wert wesentlich von chemisch-thermischen Reaktionsverhalten des Kältemittels, des Kältemaschinenöles, der Restfeuchtigkeit, der Restverschmutzung und der Qualität der Isolierstoffe abhängt. Während bei sauggasgekühlten Verdichtern, wie sie meist bei Verdampfungstemperaturen oberhalb -10°C Verdampfungs temperatur und damit bei Klimaanwendungen immer und im Normalkühlbereich teilweise eingesetzt werden, die Motortemperaturgrenze im Allgemeinen nicht relevant ist, tritt sie bei nicht sauggasgekühl-

ten (auch fremd- oder außengekühlt genannten) Motoren im Normalkühl- und vor allem im Klimaeinsatz oft einschränkend in Erscheinung.

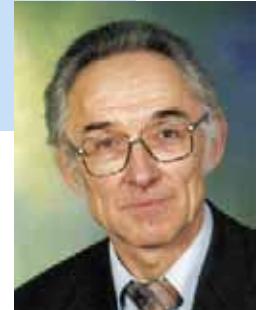
Die Anpassung der Motoren an die Verdichterbedingungen erfordert die enge Zusammenarbeit von Motor- und Verdichterentwickler. Zur Prüfung der Motoreignung dienen verschiedene Kurzzeitprüfverfahren, die sich hinsichtlich der Prüfbelastung unterscheiden, aber fast alle mit 20K Über temperatur gegenüber der zulässigen Betriebstemperatur stattfinden. Dabei liegt der Gedanke zugrunde, dass sich die chemische Reaktionsgeschwindigkeit je 10K höherer Reaktionstemperatur verdoppelt. Dabei beeinflussen sich gegenseitig chemische Reaktionsgeschwindigkeit, Übertemperatur und mechanische Belastung des Isolationsniveaus, so dass einem modernen Motor-Schutz eine entsprechend hohe Bedeutung beigemessen werden muss.

Die meisten Verdichterhersteller bieten zwei Motoren an, einen für den Einsatz bei geringeren Verdampfungstemperaturen mit Außenkühlung und einen für den Bereich der höheren Verdampfungstemperaturen mit Sauggaskühlung bis zum oberen Grenzwert.

Im Weiteren erfolgt die Konzentration auf Industrie- und kommerzielle Anwendungen. Dabei kommen selten einphasige Wechselstrommotoren vor, es werden vorrangig die dreiphasigen Drehstrommotoren verwendet, die sowohl sauggas- als auch außengekühlt angewendet werden.

zu den Autoren

**Dr.-Ing.
Ulrich Adolph,**
Berater Kälte- und
Klimatechnik,
Leipzig



**Dipl.-Ing.
Dipl.-Kfm.
Marc Woerner,**
Leiter Geschäftsbereich Schutz- und Steuerungstechnik, KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Forchtenberg



Das Charakteristische an den hermetischen und halbhermetischen Asynchronmotoren ist, dass sie meist hoch ausgelastet sind. Während des Einschaltmomentes eines Motors treten dabei sehr hohe Anlaufströme auf, die das 8- bis 10-fache des Nennstromes betragen.

Diese Anlaufströme wirken in diesem ersten kurzen Moment wie ein Kurzschluss. Erst wenn der Motor seine Nendrehzahl erreicht hat, fließt der in der Verdichterdokumentation angegebene Nennstrom bei entsprechender Nennlast.

Im Rahmen der technischen Weiterentwicklung wurde in den letzten Jahren aus wirtschaftlichen Gründen der spezifische Werkstoffeinsatz beim Bau der Elektromotoren ständig herabgesetzt, wodurch die

¹ Adolph, Ulrich und Woerner, Marc: „Richtige Verdichterüberwachung sichert Zuverlässigkeit, Kältemittelverdichter – Einsatzgrenzen und Schutzeinrichtungen“, KK DIE KÄLTE & Klimatechnik, 5/2005

Motoren bis zur technischen Grenzleistung ausgenutzt werden.

Solche modernen Motoren werden in der außengekühlten Version im normalen Betrieb möglichst nah an ihrer thermischen Grenze mit einem relativ geringeren Sicherheitsabstand betrieben. Somit sind sie bei sehr schnellen Temperaturansteigen, z.B. durch Blockierung des Antriebs oder bei Ausfall der Kühlung besonders gefährdet.

Die thermischen Reserven sind gering und die Motoren sind somit gegen Überlastungen und andere Störungen empfindlich. Hinzu kommt bei den hermetischen und halbhermetischen Verdichtern das komplizierte System von gegenseitig abhängigen Parametern der unterschiedlichen Lastfälle. So kann z.B. ein Motor, der über einen Frequenzumformer drehzahlstellbar angetrieben wird, im Teillastbetrieb höheren Beanspruchungen ausgesetzt sein als bei Nennlast.

Im Bild 1 ist beispielhaft ein Halbhermetikverdichter mit sauggasgekühltem Einbaumotor gezeigt. Dabei strömt nicht das gesamte Sauggas am Motor vorbei, sondern ein Teil gelangt direkt vom Saugstutzen auf kurzem Wege zum Saugraum des Zylinderkopfes. Der andere Teil des Sauggases umströmt das Statorpaket des Motors und auf dem Rückweg durch die Bohrungen im Rotor, so dass beide Komponenten gut gekühlt werden. Natürlich strömt ein kleinerer Teil dieses Kühlstromes auch durch den Spalt zwischen Stator und Rotor, was im Bild nicht gesondert markiert ist. Bei rein sauggasgekühlten Verdichtern liegt der Saugstutzen am seitlichen Motorverschlussdeckel und der gesamte Sauggasstrom trägt zur Kühlung bei.

Bei außengekühlten Motoren wird das Sauggas direkt am Zylinderkopf oder in seiner Nähe angesaugt, wobei der Motor natürlich auch von der Kältemittelatmosphäre umgeben ist, jedoch ohne Wärme-transportaufgabe. Der größte Teil der Motorwärme gelangt über die Motorkühlrippen nach außen, und zwar umso mehr, je besser der Motor von außen umströmt wird. Vorteilhaft ist bei luftgekühlter Verflüssigung die Anordnung des Verdichters im Verflüssiger-Luftstrom. Es gibt auch Beispiele mit gesondert angeordneten Verdichterkühllüftern.

An die Motorschutzsysteme ergeben sich aus den vielfältigen Betriebsbedingungen der Einbaumotoren hohe Anforderungen, die bereits bei der Auswahl und später bei der Einstellung der Schutzsysteme besonders zu beachten sind. Im Folgenden sol-

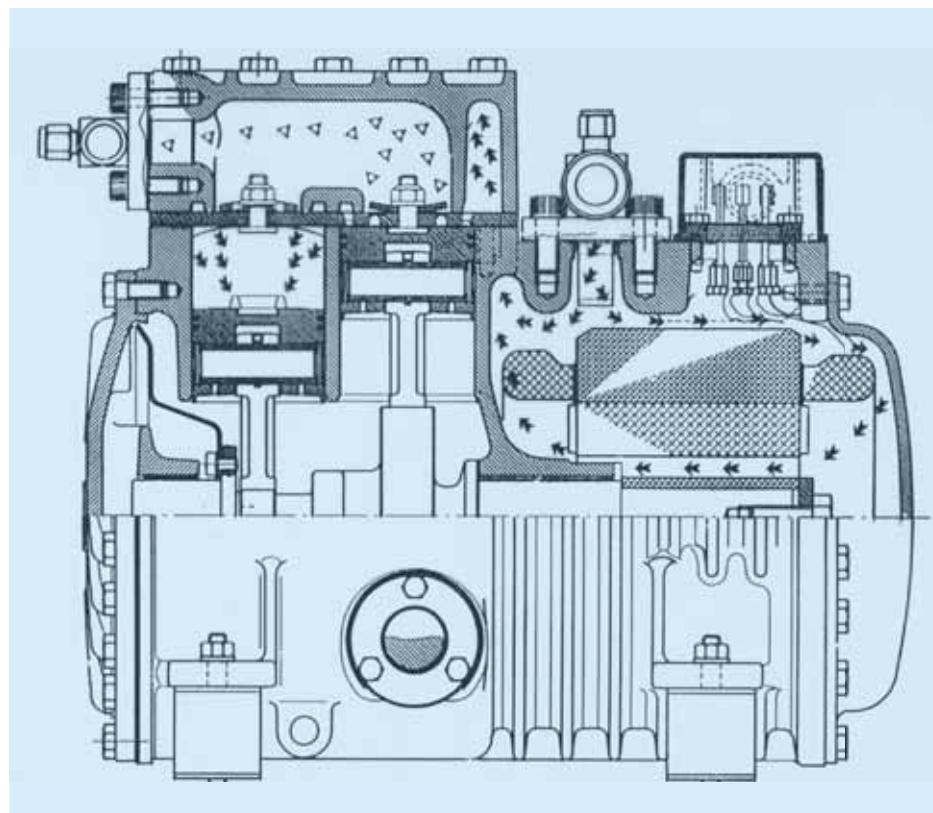


Bild 1 Beispiel eines Halbhermetikverdichters mit sauggasgekühltem Einbaumotor

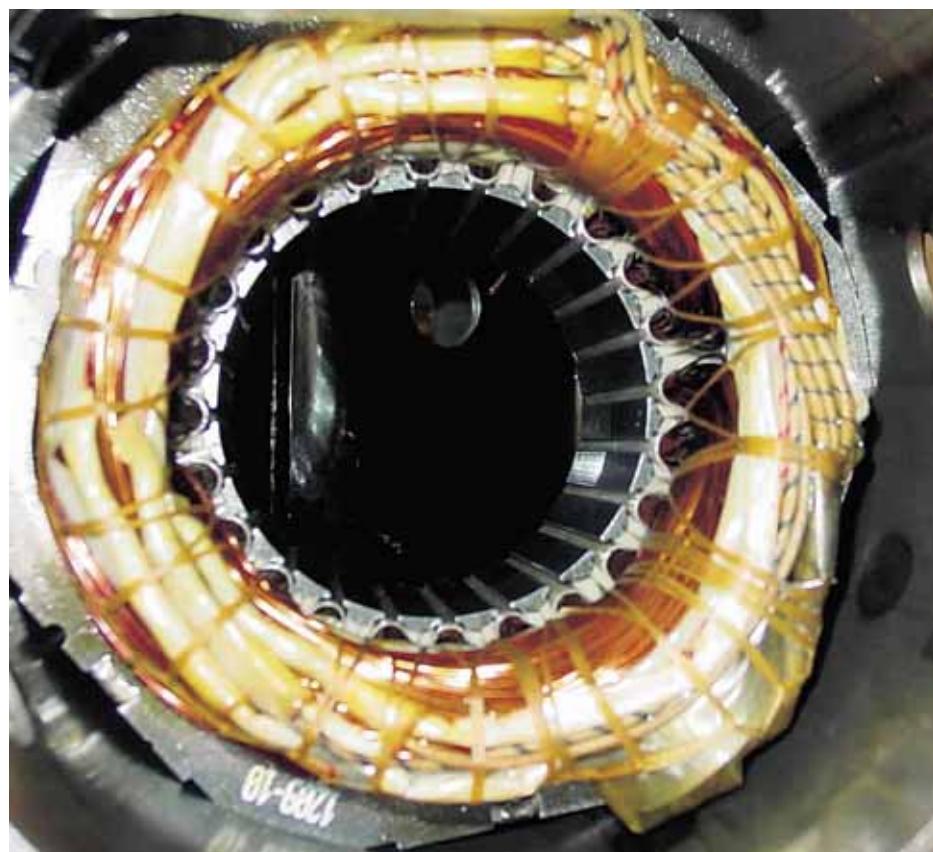


Bild 2 Wickelkopf eines Hermetikverdichters mit Sternpunkt-Bimetallschalter. Rechts unten ist die platzraubende Anbringung des Schalters zu sehen

len für die Überwachung der Motortemperaturen die drei prinzipiell unterschiedlichen Methoden vorgestellt und gegeneinander bewertet werden.

Die drei Überwachungsmethoden für die Motortemperatur

- Die kleinen Hermetikverdichter mit meist einphasigen Motoren für die Massenfertigung der Weißen Ware und der Kleinklimageräte werden mit einfachen Bimetallschaltern geschützt, die sich an einem Wickelkopf des Motors befinden und bei Erreichen der Grenztemperatur den Stromfluss unterbrechen.
- Hermetikverdichter für größere Leistungen mit Drehstromantrieb werden mit Bimetallschaltern ausgestattet, die an einem Wickelkopf des Motors sitzen und bei Erreichen der Grenztemperatur den Sternpunkt öffnen, so dass der Stromfluss unterbrochen wird. Diese Schalter sind darüber hinaus so ausgelegt, dass sie auch beim Erreichen der zulässigen Stromstärke öffnen, selbst wenn die Grenztemperatur des Wickelkopfes noch nicht erreicht sein sollte. Ihre jeweilige Anpassung an die Motorbedingungen ist ein ernster Teil der Entwicklungsarbeit am Verdichter. Eine wesentliche Herausforderung stellt die „Einstellung“ der Bimetallschalter hinsichtlich des Anlaufs dar. Hier dürfen sie bei dem kurzschlussähnlichen Anlaufstrom nicht öffnen.
- Halbhermetikverdichter aller Bauarten mit Drehstromantrieb sind vorwiegend mit PTC-Temperaturfühlern in den drei Phasen der Motorwicklung ausgerüstet, die bei Überschreiten der zulässigen Temperatur einen Ruhestrom unterbrechen und über ein Schaltgerät den Verdichter über ein Signal abschalten.

Allen drei Schutzarten ist gemeinsam, dass sie in ihrem Anwendungsbereich für die meisten thermischen Komplikationen der Verdichtermotoren den Motor zuverlässig abschalten und vor der Zerstörung schützen. Der einfache Bimetallschalter soll nicht weiter betrachtet werden, da er für die hier betrachteten Anwendungen in Gewerbe und Industrie nicht ausreichend schützt und deshalb in diesem Bereich kaum zu finden ist.

Der Sternpunkt-Bimetallschalter als die kostengünstigere Variante der beiden verbleibenden Arten ist unzugänglich im Inneren des Hermetikverdichters angeordnet. Nach seinem Ansprechen infolge Überschreitung der zulässigen Temperatur ist kaum eine Diagnose möglich, da die Wider-

stands- bzw. Spannungsprüfung bei durchgebrannter Wicklung oder geöffnetem Schalter zu gleichen Ergebnissen führen. Man muss die Abkühlzeit bis zum Rückschalten abwarten und feststellen, ob der Motor wieder anläuft oder nicht. Das ist ein echter Nachteil dieser Schalter, wodurch es wegen der teilweise langen erforderlichen Abkühlzeiten auch immer wieder vorkommt, dass abgeschaltete Verdichter als schadhaft ausgebaut und durch neue ersetzt werden, obwohl sie noch völlig intakt sind.

Ein zweites Problem bei diesen Schaltern ist ihre räumliche Anordnung am Wickelkopf. Sie haben Abmessungen je nach Schaltleistung von über 10 mm Dicke und einigen zehn mm Durchmesser und nehmen viel Platz in Anspruch. Nicht in allen Fällen passen sie deshalb in den meist begrenzten Einbauraum des zur Verdichterseite gewandten Wickelkopfes des Motors, der bei sauggaskühlten Verdichtern wärmer wird als der ansaugseitige Wickelkopf und deshalb vorrangig geschützt werden muss. Bei der Anordnung auf der freien Saugseite kann dagegen der Schalter noch ausreichend gekühlt sein, während der verdichterseitige Wickelkopf eigentlich schon zu warm ist. Dann kommt es trotz Schutzeinrichtung zum Motorausfall. Die Praxis bestätigt diesen Schwachpunkt, insbesondere bei Ausfall einer Phase und Weiterlauf des Verdichters, wobei sich der Wickelkopf schnell erwärmt, der saugseitige Fühler aber durch das kühle Sauggas weiter unter der Schalttemperatur gehalten wird. Die Anwendungsgrenze dieser Schalter wird auch zu höheren Leistungen hin durch ihre Baugröße bestimmt, denn ihre Abmessungen nehmen mit zunehmendem Schaltstrom stark zu, so dass auch unter Kostengesichtspunkten eine Wirtschaftlichkeits-Betrachtung sinnvoll ist. Derzeitig zeichnet sich zunehmend, aufgrund der noch zu beschreibenden Vorteile, die Tendenz zu Gunsten der PTC-Motorschutzeinrichtung ab.

Die PTC-Motorschutzeinrichtung

Die PTC-geschützten Motorwicklungen weisen im Allgemeinen diese Schwachstellen nicht auf, da sie in alle Abmessungen integrierbar sind. Sie werden bei der Motorherstellung in die Wicklungen mit eingebunden und benötigen keinen zusätzlichen Einbauraum. Sie bieten darüber hinaus auch den Vorteil der Diagnose, sie können zur Signalisierung von über das normale Niveau ansteigenden Temperaturen benutzt werden, um vor dem Abschal-

ten schon anlagenseitig eingreifen zu können oder sie können auch zur Auswertung des Temperaturänderungsgradienten herangezogen werden. Damit ist eine Integration in das Steuerungs- und Überwachungssystem einer Kälteanlage möglich. Die für die Fühler definierte und bei der Herstellung geprüfte Ansprechzeit ist außerordentlich kurz und von den Sternpunkt-Bimetallschaltern nicht zu erreichen. Offenbar sind die genannten Einsatzbereiche historisch gewachsen, die sich leistungsmäßig in einem weiten Bereich überschneiden. Dem direkten Bimetall-Stromschalter sind zu höheren Leistungen hin allerdings technische Grenzen gesetzt, während man für die kleinen Motoren unter 1 kW aus Kostengründen kaum den PTC-Schutz vorsehen wird.

Die Überwachung nach dem Schema von Bild 3 schaltet den Motor nicht nur bei der zulässigen Grenztemperatur ab, sondern ermöglicht die Kontrolle der Temperatur-Änderungsgeschwindigkeit (eigentlich Widerstands-Änderungsgeschwindigkeit des Fühlerwiderstands), so dass bei ungewöhnlich schnellem Temperaturanstieg schon bei einer darunter liegenden Temperatur abgeschaltet werden kann und der Motor einen geringeren Temperaturüberlauf erfährt. Das wirkt sich vorteilhaft auf die Alterungsprozesse des Isolierstoffsystems aus.

Eine weitere Auswertungsmöglichkeit des Temperatursignals ist dadurch gegeben, dass man bei der oder den ersten Abschaltungen den Motorschutz selbsttätig zurücksetzen lassen kann und erst bei z.B. der vierten Abschaltung Handreset programmiert wird, um vor dem Reset die Ursache des Ansprechens zu ermitteln und abzustellen. Beim Phasenfolgeschutz nach Bild 3 fällt bei falscher Phasenfolge das Relais ab und das Gerät ist verriegelt. Das erfolgt in gleicher Weise bei Phasenausfall. Folgende anwendungsspezifischen Zusatzkonfigurationen sind gegeben:

- Nach temperaturbedingter Abschaltung und Abkühlung bis auf die eingestellte Wiedereinschalttemperatur wird eine Zeitverzögerung von 5 min gestartet und erst danach schaltet das Gerät wieder frei,
- Die Phasenüberwachung ist im Zeitfenster ab 1 s bis 5 s nach Verdichterstart aktiv,
- Interne Gerätefehler führen zu verriegelter Abschaltung,
- Die Verriegelung kann durch einen Netzreset von etwa 5 s aufgehoben werden,
- Galvanische Trennung zwischen Sensor- und Versorgungskreisen ist gegeben.

Es wird manchmal argumentiert, dass der Nachteil der PTC-Überwachung darin be-

steht, die Stromstärke analog dem Sternpunkt-Bimetallschalter nicht mit zu überwachen. Das ist aber im Allgemeinen belanglos. Die Stromstärke wird ohnehin durch das vorgesehene Sicherungssystem der Stromversorgung, ggf. durch ein Motorschutzrelais im Anschlusskasten überwacht. Das ist natürlich nur grob, aber akzeptabel. Der Motor kann bis fast zu seinem Kippmoment (in der Praxis bis etwa 60% des Kippmomentes) so viel Strom aufnehmen wie er braucht, wenn nur die Temperatur in den vorgegebenen Grenzen bleibt. Andererseits ist jedoch der alleinige Schutz durch das äußere Motorschutzrelais nicht ausreichend, da die zulässige Grenzstromstärke für den Anwender kaum ausreichend genau einstellbar ist. Hinzu kommt, dass bei ausbleibender oder verminderter Sauggaskühlung Übertemperaturen auch bei niedrigeren Strömen vorkommen können. Weitere Einflüsse, die für eine PTC-Motorschutzeinrichtung sprechen, sind: Wärmeeinstrahlungen, Schalthäufigkeit des Verdichters, Zusatzverluste durch FU-Betrieb (insbesondere Eisenverluste durch Oberwellen), Netzspannungsschwankungen, Leistungsfaktor $\cos\varphi$, – Resonanzen, unterschiedliche Betriebsarten des Verdichters.

In der in Bild 4 aufgeführten Tabelle ist eine Bewertung der beiden unterschiedlichen Motorüberwachungstechniken dargestellt, die sowohl anwenderspezifische als auch herstellerspezifische Gesichtspunkte berücksichtigt. Im Ergebnis der Wichtung kann man selbst bei Berücksichtigung eines größeren Toleranzbereichs ableiten, dass die PTC-Überwachung das technisch höhere Niveau darstellt.

Die Tabelle nach Bild 4 ist als Mittelwertbildung im Ergebnis einer Expertenbewertung entstanden. In den ersten Zeilen mit den hohen Wichtungen kommt die gute Wirksamkeit beider Systeme zum Ausdruck. Die wesentlichen Vorteile für die PTC-Überwachung ergeben sich aus der Einbindungsmöglichkeit des gewonnenen Signals in den übergeordneten Regelprozess mit den beschriebenen Auswertemöglichkeiten und aus dem von der Leistung unabhängigen geringen Einbauvolumen in beliebig große Motoren. Die EMV-Sicherheit ist natürlich beim Sternpunkt-Bimetallschalter unproblematisch zu gewährleisten, wobei es bei modernen Microprozessor gesteuerten Motorschutzgeräten entsprechende Filterfunktionen gibt.

Zum Motor gehört auch die Startbedingung. Bei Einhaltung des für die Installationsseite zulässigen Anlaufstromes gelingt

fast immer ein direkter Start ohne Druckentlastung, d.h. eine dadurch bedingte Grenze liegt bei den meisten Verdichtern außerhalb der anderen Einsatzgrenzen und braucht nicht zusätzlich berücksichtigt zu werden. Einschränkungen kann es abhängig von der Motorauslegung im Bereich der maximalen Druckdifferenz geben, bei der das größte Spitzendrehmoment infolge der Kolbenkräfte aufzubringen ist, oder im Bereich großen Massedurchsatzes, d.h. bei hoher Verdampfungstemperatur, in Verbindung mit einem hohen Verflüssigungs-

druck, bei dem das größte mittlere Drehmoment auftritt. Bei parallel geschalteten Verdichtern ohne Anlaufentlastung erfolgt der Start des oder der Folgeverdichter gegen den Druck des Pilotverdichters und erfordert damit dieses große statische Anlaufmoment. Die Hersteller bieten als Konsequenz meistens die Verdichter nur für Direktanlauf an. Ursache dafür ist das geringe Massenträgheitsmoment der Verdichter, die mit 2- oder 4-poligen Motoren direkt angetrieben werden. Das Anlaufmoment im Y-Modus ist nur gering bzw. zu gering

und der große Drehzahlverlust in der Umschaltzeit von Y- auf D-Schaltung führt dazu, dass nach dem Umschalten etwa bis zu 90% der Stromstärke des Anlaufstromes gegenüber dem Direktanlauf auftreten, und somit die erwünschte netzseitige Entlastung nicht auftritt. Natürlich ist die Anlaufentlastung durch ein Rückschlagventil in der Druckleitung des Folgeverdichters und einen Entlastungsbypass für den Start des Folgeverdichters sehr günstig, manchmal unumgänglich.

Beim Betrieb der Verdichtermotoren am Frequenzumformer spielt außer dem Ölversorgungsproblem ein weiterer Gesichtspunkt eine wesentliche Rolle. Wenn der Frequenzumformer aus Kosten- und Abmessungsgründen ohne wirksamen Sinusfilter ausgeführt ist, und das ist oft der Fall, erzeugt die aus einer Vielzahl von Rechteckimpulsen großer Spannungssteilheit bestehende Spannungsform einen großen Blindstromanteil im Motor, so dass die Motorerwärmung deutlich größer wird als bei oberwellenfreier Sinusspannung. Selbst die verrauschte Spannung eines nur teilweise glättenden Sinusfilters ist in dieser Frage nicht zu vernachlässigen. Die daraus resultierende erhöhte Motortemperatur schränkt nicht nur die Einsatzgrenze des Motors ein, sondern führt auch zu einer höheren Lagertemperatur für dasjenige Lager des Verdichters, das vom Wickelkopf einer Seite umschlossen ist. Meist ist dies das Hauptlager des Verdichtertriebwerkes. Ein weiterer Wärmefluss vom ebenfalls mehr erwärmteten Rotor des Motors über die Welle zu diesem Lager verstärkt diesen Effekt. Dieser Fakt ist bei der Bestimmung der Teillasteinsatzgrenzen zu berücksichtigen.

Insgesamt gesehen kann man auf die Motortemperaturüberwachung auch im Teillastbetrieb nicht verzichten, um dessen eigene Einsatzgrenze zu gewährleisten. ■

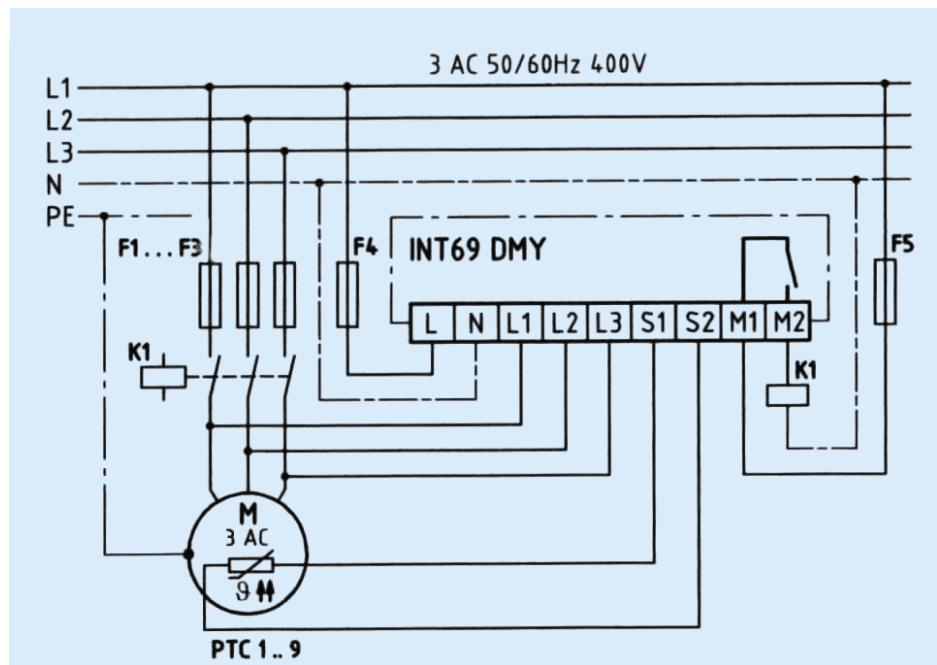


Bild 3 Schaltschema der PTC-Überwachung eines Verdichtermotors mit zusätzlicher Phasenfolgeüberwachung

	Absolute Bewertung			Gewichtete Bewertung		
	PTC	Bimetall	Wichtung	PTC	Bimetall	erreichbar
Überlastungsschutz	6	6	1	6	6	6
Lebensdauer	6	5	1	6	5	6
Blockierter Rotor	6	6	1	6	6	6
Ansprechzeit	6	5	1	6	5	6
Phasenausfall	6	5	1	6	5	6
Schaltfrequenz	6	0	0,5	3	0	3
Spannungsschwankungen	6	6	0,5	3	3	3
Kältemitteltemperatur	6	5	0,5	3	2,5	3
Kühlungsausfall (Reduzierter Kältemittel Massenstrom)	6	6	1	6	6	6
Signal nach außen	6	0	1	6	0	6
EMV-Sicherheit	4	6	1	4	6	6
Einbaufähigkeit	5	2	0,3	1,5	0,6	1,8
Einbauraum	5	1	1	5	1	6
Kosten	5	6	0,3	1,5	1,8	1,8
Lagerhaltungsaufwand	5	1	0,3	1,5	1,2	1,8
Summe	-	-	-	64,5	50,1	68,4
Mittelwert				4,3	3,3	4,6
Relative Bewertung (68,4=100%)				94 %	73 %	100 %

Bild 4 Bewertung des Motorschutzes mittels Sternpunkt-Bimetallschalter und PTC-Fühlern.
Legende: 1 unzureichend erfüllt; 6 voll erfüllt