

Möglichkeiten und Grenzen des Motorschutzes mit Thermistoren

H. Greiner, Aichwald

Die Einführung des „Thermischen Maschinenschutzes TMS“ mit Thermistoren in den 60er Jahren wurde von Herstellern und Anwendern sehr begrüßt – die anfängliche Bezeichnung „Motorvollschutz“ signalisierte die hohen Erwartungen. Ausfälle, die ein „Vollschutz“ eigentlich hätte vermeiden müssen, zeigten dann die Grenzen dieses Überlastungsschutzes. Im Beitrag wird gezeigt, wo die Möglichkeiten und Grenzen des TMS liegen und wie in Kombination mit dem altbewährten „Motorschutzschalter“ doch ein „Vollschutz“ erreichbar ist.

1 Wirkungsweise des Thermistor-Motorschutzes

Kaltleitertemperaturfühler oder Thermistoren sind temperaturabhängige Widerstände mit positivem Temperaturkoeffizienten (PTC), das heißt, sie vergrößern nach Bild 1 bei einer bestimmten Nenn-Ansprech-Temperatur NAT (z. B. 130 °C bei Motoren mit Isolierstoffklasse B) plötzlich sehr stark ihren Widerstand.

Gemäß Bild 2 liegen die Temperaturfühler in Reihe mit der Relaispule eines Auslösegeräts. Bei Erreichen der Ansprechtemperatur oder bei einer ungewollten Leitungsunterbrechung schaltet das Relais um und trennt den gefährdeten Motor vom Netz. Folgende Regeln sind beim Prüfen der Wirkungsweise von Thermistoren zu beachten:

- Durchgang
Maximal AC 2,5 V pro Fühler.
Höhere Spannungen (z. B. Summer, Wechselstrom-Lampe) führen zur Zerstörung.
- Isolation
Prüfwechselspannung nach IEC 60 034-1 und VDE 0530-1 zwischen Fühlerkreis und der mit Masse verbundenen und an Erde gelegten Motorwicklung.
Bei der Isolationsprüfung der Motorwicklung muss der Fühlerkreis geerdet sein, um Schäden durch kapazitive Aufladung zu vermeiden.
- Widerstand bei Raumtemperatur
Nach Norm sind Werte $R \leq 250 \Omega$ pro Fühler zulässig; erfahrungsgemäß liegt der Messwert für die Reihenschaltung von drei Fühlern bei 100 ... 600 Ω .
Maximale Messspannung AC 2,5 V pro Fühler.
- Nenn-Ansprech-Temperatur NAT
Abstufung und Farbkennzeichnung nach DIN 44 081 (Tafel 1)

- Tatsächliche Ansprechtemperatur
Wenn die Widerstandsgrenzen nach Bild 1 eingehalten werden und trotzdem Zweifel an der tatsächlichen Ansprechtemperatur bestehen, so empfiehlt sich eine Überprüfung nach folgendem Verfahren: Der Stator mit Wicklung wird im Trockenofen oder durch Anschluss an eine geeignete Heizspannung langsam aufgeheizt. In der Nähe der NAT sollte der Temperaturanstieg nicht mehr als 2 K/min betragen. Die tatsächliche Ansprechtemperatur sollte von der NAT nicht mehr als ± 5 K abweichen.

2 Einbau der Temperaturfühler

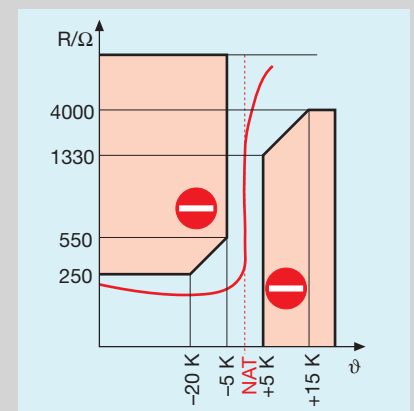
Die Funktion des TMS hängt entscheidend vom richtigen Einbau der Fühler ab. Sie sollten möglichst im Wicklungsabschnitt mit der höchsten Temperatur („hottest spot“) und mit gutem Wärmekontakt zur Wicklung angebracht werden.

2.1 Oberflächenbelüftete Maschinen (z. B. IC 411, IC 416)

Der von den Rührflügeln am Rotor erzeugte primäre Kühlkreislauf (innere Luftbewegung um die Wickelköpfe) ist im Allgemeinen nicht sehr effektiv. Die Wärme fließt hauptsächlich über die Nuten zum Blechpaket und wird von dort zur meist verrippten

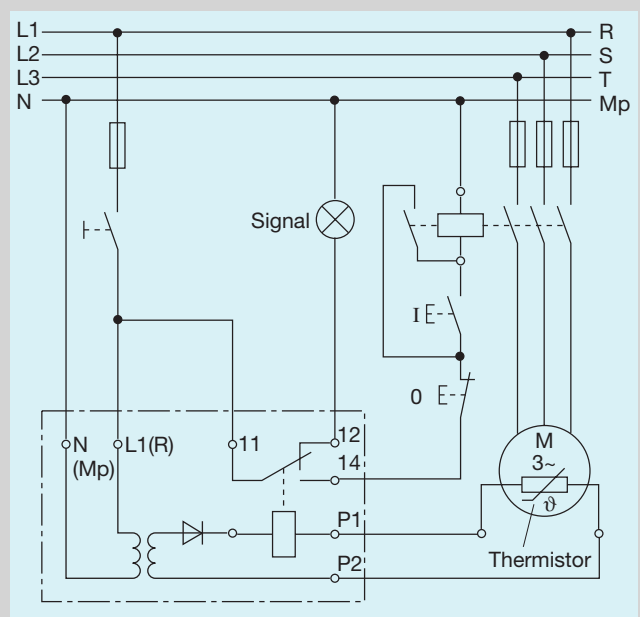
Tafel 1 Nenn-Ansprech-Temperatur (NAT) – Abstufung und Farbkennzeichnung nach DIN 44 081

NAT (°C)	Farbcode	NAT (°C)	Farbcode
60	weiß/grau	140	weiß/blau
70	weiß/braun	145	weiß/schwarz
80	weiß/weiß	150	schwarz/schwarz
90	grün/grün	155	blau/schwarz
100	rot/rot	160	blau/rot
110	braun/braun	170	weiß/grün
120	grau/grau	180	weiß/rot
130	blau/blau		



1 Zulässiger Toleranzbereich für die Kennlinie eines Thermistors nach DIN 44081, Tabelle 1
NAT Nenn-Ansprech-Temperatur

2 Schaltbild für Thermischen Motorschutz (TMS) mit Kaltleiter-Temperaturfühlern



Autor

Obering. Helmut Greiner war Mitglied verschiedener DKE- und IEC-Komitees.

Gehäuse-Oberfläche geleitet. Der „hottest spot“ ist bei dieser Maschinenart im Wickelkopf auf der dem Außenlüfter abgewandten Seite – in der Regel also auf der A-Seite (Bild 3).

2.2 Durchzugbelüftete Maschinen (z. B. IC 01, IC 06)

Die Wickelköpfe werden intensiv vom Kühlluftstrom umspült. Die Wärme fließt hauptsächlich aus der Nut zum Wickelkopf. Der „hottest spot“ ist bei dieser Maschinenart etwa in Nutmitte (Bild 4).

Wenn die Nutfüllung eine Anordnung der Fühler in der Nut nicht erlaubt, ist der Wickelkopf auf der Luftaustrittsseite zu wählen und der Fühler so anzubringen, dass er nicht direkt vom Luftstrom getroffen wird.

2.3 Einbettung in den Wickelkopf

Die Temperaturfühler sind bei der Herstellung der Wicklung im Wickelkopf parallel zu den Wickeldrähten einzubetten. Nach den Angaben eines Fühlerherstellers [4] sollten die Anschlusslitzen auf einer Länge von 30 ... 40 mm mit eingebettet werden. Übermäßige mechanische Beanspruchung der Fühler beim Formen des Wickelkopfes ist zu vermeiden (Bild 5).

2.4 Nachträgliche Anbringung am Wickelkopf

Wegen der unzureichenden Wärmeübertragung sollte diese Anbauart möglichst auf Sonderfälle beschränkt werden.

In einem grundsätzlichen Versuch wurden die Übertemperaturen bei verschiedenen Anbauarten im Vergleich zur üblichen Einbettung der Thermistoren ermittelt:

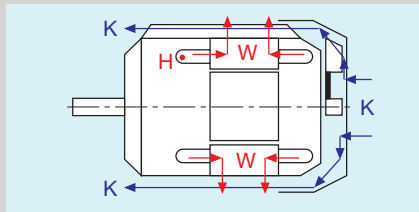
Anbauart	Erhöhung der Ansprechtemperatur
mit Wärmeleitpaste ohne wärmeleitende Hilfsmittel	30 K
direkt anbandagiert	50 K
mit ungeeigneter, plastischer Masse anbandagiert	80 K

Wenn es in Sonderfällen unumgänglich ist, die Thermistoren nachträglich am Wickelkopf anzubandagieren, so wird empfohlen:

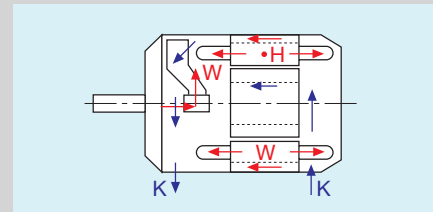
- Verwendung von Wärmeleitpaste zur Verbesserung der Wärmeübertragung.
- Herabsetzung der NAT um 10 ... 20 K gegenüber den bei Einbettung üblichen Werten (vgl. Abschnitt 4).

3 Temperaturverlauf in Wicklung und Fühler

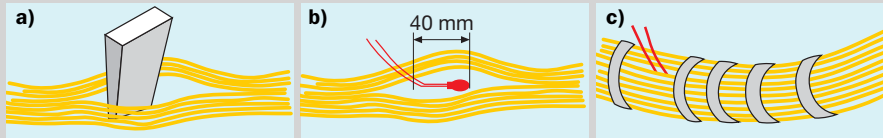
Die elektrische Isolierung zwischen Fühler und Wicklung verzögert den Wärmeübergang vom Kupferdraht zum Thermistor. Je nach Betriebs- und Überlastungsart ergibt sich eine mehr oder weniger große Temperaturdifferenz.



3 Wärmefluss (W), Kühlluftstrom (K) und „hottest spot“ (H) bei oberflächenbelüfteten Maschinen (z. B. IC 411, IC 416)

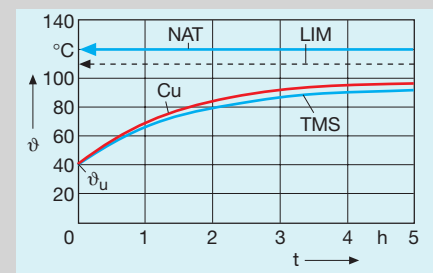


4 Wärmefluss (W), Kühlluftstrom (K) und „hottest spot“ (H) bei durchzugbelüfteten Maschinen (z. B. IC 01, IC 06)



5 Arbeitsschritte beim Einbau der Thermistoren in den Wickelkopf nach Herstellerangabe [4] a) Spreizen des Wickelkopfes; b) Einlegen des Thermistors; c) Bandagieren des Wickelkopfes

6 Temperaturverlauf (ϑ) in Kupfer (Cu) und Thermistor (TMS) im Vergleich zur Grenztemperatur (LIM) und Nenn-Ansprechtemperatur (NAT) Dauerbetrieb S1 – Zündschutzart EEx e II T3 – Wärmeklasse B – Umgebungstemperatur (ϑ_u) 40 °C



3.1 Langsamer Temperaturanstieg (z. B. Betriebsart S1)

Bei Dauerbetrieb S1 wird die Beharrungstemperatur je nach Größe und Belüftung des Motors erst nach 2 ... 8 h erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen Wicklung und Thermistor ist vernachlässigbar (Bild 6).

Bei starker Überlastung (z. B. 1,5 ... 2-fache Bemessungsstrom) wird der „Temperaturüberlauf“ der Wicklung zwar etwas höher, bleibt aber im Rahmen der thermischen Überlastbarkeit einer guten Isolation, sofern die Überlastung nicht zu häufig auftritt. **Überlast bei laufendem Motor wird vom TMS erfasst.**

3.2 Rascher Temperaturanstieg

Drehstromasynchronmotoren nehmen bei festgebremstem Läufer (also im „Kurzschluss“) den Anzugsstrom auf, der je nach Größe, Polzahl und Auslegung des Motors etwa 400 ... 800 % des Bemessungsstroms beträgt. Die Erwärmung im Kupfer – quadratisch abhängig vom Strom – steigt sehr rasch an; ihr Verlauf kann während der ersten Sekunden gemäß Bild 7 linear angenommen werden. Die Temperatur am Thermistor folgt nach einer „Ankoppelungszeit T_K “, die vom Wärmeübertragungswiderstand – also z. B. von der Dicke der Isolation – abhängig ist. Es sind Werte von 3 ... 6 (8) Sekunden üblich.

Die Wicklungstemperatur beim Ansprechen des TMS wird also immer höher sein als die NAT. Dieser „Temperaturüberlauf“ ist abhängig von der

- Ankoppelungszeit T_K
- Anstiegsgeschwindigkeit $v = \Delta\vartheta / T_K$.

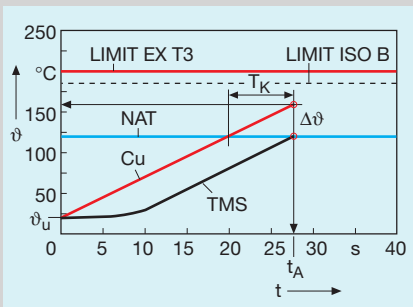
3.2.1 Einfluss der Ankoppelungszeit T_K
Bei einer Kurzschluss-Stromdichte von $i_A = 30 \text{ A/mm}^2$ ist eine Temperatur-Anstiegsgeschwindigkeit $v = 5 \text{ K/s}$ zu erwarten. Beträgt bei ungünstiger Annahme die Ankoppelungszeit $T_K = 8 \text{ s}$, so ist der Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta = T_K \cdot v = 8 \text{ s} \cdot 5 \text{ K/s} = 40 \text{ K}$. Wird die Isolation des Fühlers so „verbessert“, dass die Ankoppelungszeit auf den doppelten Wert ansteigt, also $T_K = 16 \text{ s}$, so wird der Temperaturüberlauf 80 K. Die Abschaltung erfolgt also erst bei einer Temperatur, die um 80 K über der Nenn-Ansprechtemperatur (NAT) des Fühlers liegt (Bild 8).

Die Ankoppelungszeit sollte möglichst niedrig gehalten werden, indem für die Isolierung des Fühlers möglichst dünne Folien oder Schrumpfschläuche verwendet werden.

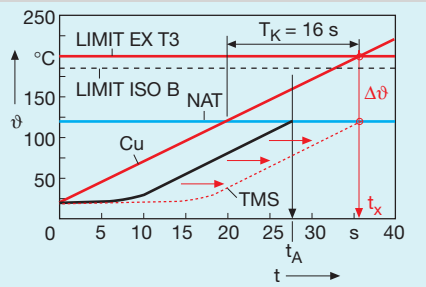
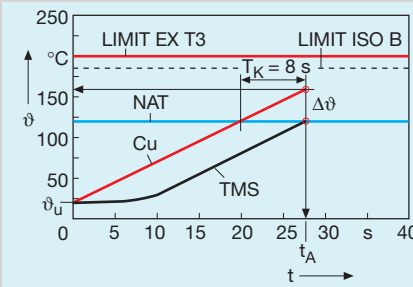
3.2.2 Einfluss der Stromdichte i_A
Die Anstiegsgeschwindigkeit der Temperatur hängt direkt von der Kurzschluss-Stromdichte i_A ab (siehe 9). Bei einer üblichen Ankoppelungszeit von $T_K = 8 \text{ s}$ (Bild 10) ergibt sich bei

- üblichen Stromdichten von etwa 30 A/mm^2 ein Temperaturüberlauf von etwa 40 K
- extremer Stromdichte, z. B. etwa 60 A/mm^2 ein Temperaturüberlauf von etwa 120 K.

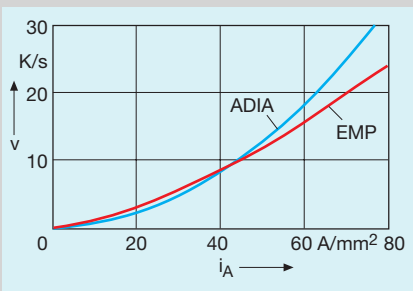
Stromdichten über etwa 40 A/mm^2 führen zu einem Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta > 50 \text{ K}$. Höhere Werte stellen eine Gefährdung für die Wicklungsisolierung dar. Thermistoren können in diesen Fällen keinen „Alleinschutz“ oder „Vollschutz“ übernehmen. Es empfiehlt sich die Kombination mit einem stromabhängigen Bimetallauslöser



7 Temperaturverlauf im Wickeldraht (Cu) und im Thermistor (TMS) bei hoher Überlastung – z. B. bei festgebremstem Läufer (n rotor = 0)
 ϑ_u Umgebungstemperatur; ϑ Temperatur; NAT Nenn-Ansprech-Temperatur des TMS; T_K Ankoppelungszeit; $\Delta\vartheta$ Temperaturüberlauf; LIMIT ISO B Grenze bei Wärmeklasse B; LIMIT EX T3 Grenze bei Temperaturklasse T3

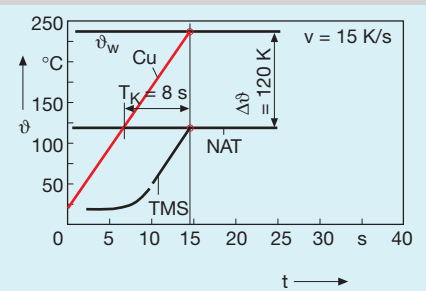
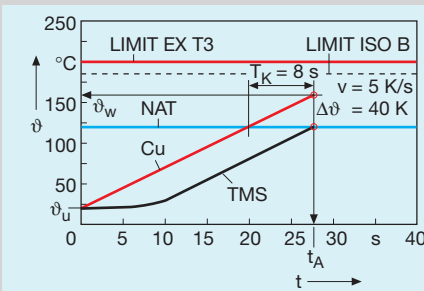


8 Temperaturüberlauf ($\Delta\vartheta$) in der Wicklung (Cu) eines hoch ausgenutzten Drehstrommotors bei üblicher ($T_K = 8$ s) und verschlechterter Ankoppelungszeit ($T_K = 16$ s) gegenüber der Nenn-Ansprech-Temperatur (NAT) des Thermistors (TMS); Temperaturanstiegsgeschwindigkeit (v) in beiden Fällen etwa 5 K/s



9 Richtwerte für die Anstiegsgeschwindigkeit (v) der Wicklungstemperatur in Abhängigkeit von der Kurzschluss-Stromdichte (i_A)
 ADIA theoretisch aus adiabatischer Erwärmung [8]
 EMP empirisch als Mittelwert aus vielen Messungen

(Quelle: Danfoss Bauer GmbH)



10 Temperaturüberlauf ($\Delta\vartheta$) in der Wicklung (Cu) eines Drehstrommotors bei üblicher ($v = 5$ K/s) und extremer Temperaturanstiegsgeschwindigkeit ($v = 15$ K/s) gegenüber der Nenn-Ansprech-Temperatur (NAT) des Thermistors (TMS); Ankoppelungszeit (T_K) in beiden Fällen etwa 8 s

Tafel 2 Richtwerte für die Zuordnung der NAT zur Isolierstoffklasse und Grenztemperatur nach dem Ansprechen gemäß IEC 60 034-11.

Isolierstoffklasse	B	F	H
Grenztemperatur nach dem Ansprechen bei			
Categorie 1 (°C)	145	170	195
Categorie 2 (°C)	165	190	215

Tafel 3 Richtwerte für die Wahl der NAT für oberflächenbelüftete (IC4X) und durchzugbelüftete (IC0X) Maschinen der Wärmeklassen B, F und H

Kühlart		NAT (°C) bei Wärmeklasse		
		B	F	H
IC 4X (oberflächenbelüftet)	Warnen	120	140	160
	Abschalten	140	160	180
IC 0X (durchzugbelüftet)	Warnen	110	130	150
	Abschalten	130	150	170

(Motorschutzschalter). Dieser ist so einzustellen, dass er bei festgebremstem Läufer (also beim Strom I_A) spätestens nach etwa 15 s auslöst.

4 Wahl der Nenn-Ansprech-Temperatur NAT

Für die Zuordnung der NAT zu einer Isolierstoffklasse lässt sich keine allgemein gültige Regel angeben, da Temperaturbild, Wärmeübergang und Einbauort bei den verschiedenen Maschinenarten zu unterschiedlich sind.

In IEC 60 034-11 wurde deshalb nach gründlicher Diskussion lediglich festgelegt, welche Grenztemperatur die Wicklung nach dem Ansprechen des TMS erreichen darf. Die Werte der „Categorie 1“ schließen eine höhere Sicherheit ein als bei „Categorie 2“, die deshalb nur mit Vorsicht und bei Kenntnis aller Betriebsbedingungen anzuwenden sind (vgl. Tafel 2).

Die Richtwerte für NAT in der Tafel 3 entsprechen einem Mittelwert aus verschiedenen Herstellerangaben und haben sich in der Praxis für oberflächengekühlte Motoren bewährt.

5 Überlastungsarten und ihre Schutzmöglichkeiten

In Tafel 4 sind häufig vorkommende Überlastungsarten und die Schutzmöglichkeiten verschiedener Einrichtungen zusammengestellt. In den Vergleich wurden Schmelzsicherungen einbezogen um deutlich zu machen, dass sie lediglich eine Schutzfunktion für die Leitung, nicht jedoch für den Motor haben.

Literatur

- [1] DIN 44080 Kaltleiter; Technische Werte und Prüfbestimmungen.
- [2] DIN 44081 Kaltleiter; Thermischer Maschinenschutz.
- [3] IEC 60034-11 Built-in thermal protection
Chapter 1: Rules for protecting of rotating electrical machines
Chapter 2: Thermal detectors and control units used in thermal protection systems
Chapter 3: General rules for thermal protectors used in thermal protection systems.
- [4] Motorschutz INT 69. Technische Information der Fa. Kriwan.
- [5] Hild, K.: Thermistor-Maschinenschutzgerät EMT. Technische Information der Fa. Klöckner-Moeller.
- [6] Greiner, H.: Überlastungsschutz bei Getriebemotoren. Sonderdruck SD 1589 der Fa. Eberhard Bauer.
- [7] Dreier, H.; Stadler, H.; Engel, U.; Wickboldt, H.: Explosionsgeschützte Maschinen der Schutzart „Erhöhte Sicherheit“ (Ex)e. Band 3 der PTB-Prüfregeln. Braunschweig: Deutscher Eichverlag GmbH, 1969; Nachdruck 1978, zu beziehen durch das Referat „Schrifttum“ der PTB, Braunschweig.
- [8] Falk, K.: Der Drehstrommotor – Ein Lexikon für die Praxis. Berlin/Offenburg: vde-verlag GmbH, 1997.

Tafel 4 Überlastungsarten und ihre Schutzmöglichkeiten

Überlastungsart	Schutzelement				
	A	B	C	D	E
1 Überstrom $I \leq 2 \cdot I_N$	○	●	●	●	●
2 Schaltbetrieb $Z \leq 30$ c/h	○	◆	◆	●	●
3 Schaltbetrieb $Z > 30$ c/h	○	○	○	●	●
4 Schweranlauf $t_a > 6$ s	○	●	●	◆	●
5 Blockierung bei $i_A \leq 40$ A/mm ²	◆	●	●	●	●
6 Blockierung bei $i_A > 40$ A/mm ²	◆	●	●	◆	●
7 Zweileiterbetrieb	○	◆	●	●	●
8 Spannungsabweichung $U > \pm 10$ %	○	●	●	●	●
9 Frequenzabweichung $f > \pm 5$ %	○	●	●	●	●
10 Umgebungstemperatur $\vartheta_U > 50$ °C	○	○	○	●	●
11 Behinderung der Kühlung	○	○	○	●	●
12 Umrichterbetrieb in unzulässigen Frequenzbereichen	○	○	○	●	●

Erläuterung der Schutzmöglichkeit:
 Kein Schutz ○
 Bedingter Schutz ◆
 Voller Schutz ●

Erläuterungen zu den Schutzelementen

Kennbuchstabe	Symbol	Erklärung
A		Träge Schmelzsicherung Nennwert $(1,6 \dots 2,5) \cdot I_N$
B		Stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) Einstellwert $I_E = I_N$
C		Stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) mit Phasenausfallempfindlichkeit Einstellwert $I_E = I_N$
D		Thermischer Motorschutz TMS (Thermistor-Auslösegerät) Ankoppelungszeit $T_K < 6$ s
E		Stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) mit Phasenausfallempfindlichkeit Trägheitsgrad T1 Einstellwert $I_E: 1,5 I_N < I_E < 0,3 I_A$ möglichst niedrig, max. $0,3 I_A$ + kombiniert mit Thermischer Motorschutz TMS (Thermistor-Auslösegerät) Ankoppelungszeit $T_K < 6$ s

Erläuterungen zu den Überlastungsarten

Kennziffer	Abk.	Erklärung
1	I I_N	Tatsächlicher Strom bei Überlastung Bemessungsstrom des Motors
2	Z	Zahl der Einschaltungen pro Stunde; bis zu 30 c/h ist im Allgemeinen keine Frühauslösung zu erwarten
3	Z	Zahl der Einschaltungen pro Stunde; bei mehr als 30 c/h ist eine Frühauslösung des Bimetallrelais nicht auszuschließen
4	t_a	Hochlaufzeit; falls länger als 6 s ist Frühauslösung des Bimetallrelais zu erwarten – evtl. Sättigungswandler verwenden
5, 6	i_A	Stromdichte bei dem Anzugsstrom I_A
7	–	Wicklungen in Δ -Schaltung sind besonders gefährdet, falls keine Relais mit Phasenausfallempfindlichkeit eingesetzt werden
8	ΔU	Spannungsabweichung als Netzschwankung; s. a. DIN VDE 0530-1, 12.3
9	Δf	Frequenzabweichung als Netzschwankung; s. a. DIN VDE 0530-1, 12.3
10	ϑ_U	Umgebungstemperatur
11	–	z. B. durch Verschmutzung der Kühlfluchtwege
12	–	z. B. Dauerbetrieb bei niedrigen Frequenzen