

Wicklungsschäden bei Drehstrommotoren

H. Greiner, Aichwald

Bei ausgefallenen Elektroantrieben empfiehlt es sich, das Schadensbild zu analysieren und entsprechende Konsequenzen zu ziehen: Wird zum Beispiel eine Wicklung im Zweileiterbetrieb (Einphasenbetrieb) zerstört, so liegt die Ursache eindeutig in der Anlage. Wird der Fehler nicht beseitigt, ist auch die Ersatzwicklung gefährdet. Der Beitrag gibt eine Hilfestellung zur Schadensbeurteilung und beschreibt, wie Antriebe mit Elektromotoren durch den Einbau von angepassten Schutzeinrichtungen noch sicherer werden.

1 Einteilung der Schadensursachen

Vorbeugende Instandhaltung beginnt bei der fachgerechten Installation eines Betriebsmittels und bei der richtigen, den Betriebsbedingungen entsprechenden Auswahl der Schutzeinrichtungen [1]. Schäden an Elektromotoren lassen sich durch die Wahl eines Qualitätsprodukts, durch richtige Anwendung und ausreichende Wartung zwar auf ein Mindestmaß reduzieren, jedoch nicht vollständig vermeiden. Es empfiehlt sich, einen ausgefallenen Antrieb nicht einfach unbesehen zu reparieren oder Garantieansprüche zu stellen, sondern den Schadensgrund zu ermitteln und weitere Folgen abzuschätzen. Nachstehend soll vor allem zur Ursachenforschung angeregt werden. Die Auswahl ist unvollständig, und häufig stellen sich die Schäden nicht so eindeutig dar wie in den gezeigten Beispielen.

Die Schäden an Drehstrom-Ständerwicklungen lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Unterbrechung
- Körperschluss
- Strangschluss (Phasenschluss)
- Windungsschluss.

Diese Fehlerarten können als **Primärfehler** (Werksfehler) oder als **Sekundärfehler** (Folgefehler) auftreten.

Bei sorgfältiger Fertigung mit festgelegten, protokollierten Zwischen- und Endprüfungen kann davon ausgegangen werden, dass die Quote der Antriebe, die das Werk mit einem Fehler verlassen, außerordentlich niedrig liegt. Die rein messtechnische Erfassung eines Wicklungsfehlers (ohne Demontage des Motors) gibt noch keinen Hinweis auf Ursache und Wirkung: Ein Drahtbruch als Folge einer Überdehnung bei der Fertigung oder als Folge einer starken Überhitzung stellt sich bei der Durchgangsprüfung an den Klemmen genau

gleich dar. Die Messung sollte daher stets durch eine visuelle Untersuchung der Wicklung in der Werkstatt ergänzt werden.

Nur wenn die genannten Fehlerarten an einer ungebräunten, gegenüber dem Neuzustand unveränderten Wicklung festgestellt werden, liegt der Verdacht eines Herstellungsfehlers nahe. Ist hingegen die Wicklung ganz verbrannt oder zeigt das unter Punkt 5 beschriebene, typische Schadensbild eines Zweileiterbetriebs, sollte der Fehler in der Betriebsweise oder in der Anlage gesucht werden.

2 Unterbrechung

Eine Unterbrechung in der Wicklung oder ihren Ableitungen zur Klemmenplatte ist bei der heutigen Isolier- und Fertigungstechnik selten. Da jeder Antrieb bei der Endprüfung einen protokollierten Probelauf absolviert, kann diese Fehlerart als Werksfehler ausgeschlossen werden.

Die Fehlersuche sollte sich daher ganz auf die Anlage konzentrieren:

- Stehen alle drei Netzleiter sicher zur Verfügung?
- Sind die Anschlussklemmen fest angezogen?
- Sind alle Anschlusssteile und die Netzleiter blank?

3 Körperschluss und Strangschluss

Im Fertigungsablauf wird die Wicklung von Niederspannungsmotoren schon vor der eigentlichen Endprüfung zwei Hochspannungsprüfungen mit bis zu 2500 V unterzogen.

Bei der Endprüfung wird meist unabhängig von der Bemessungsspannung (max. 690 V) eine Prüfspannung von 2400 V angelegt. Nach EN 60034-1 (DIN VDE 0530 Teil 1) [5], Tabelle 5, Nr. 2 beträgt die Prüfspannung $2 U_N + 1.000 \text{ V}$, also 2380 V bei der Bemessungsspannung 690 V.

Moderne Flächenisolierstoffe sind außerordentlich reiß- und durchschlagfest. Körper-

oder Strangschlüsse treten im Neuzustand der Wicklung erst bei überhöhten Spannungen von mehr als etwa 4500 V auf.

Wird ein Körper- oder Strangschluss eindeutig als Primärfehler ohne ersichtliche äußere Einwirkung (mechanische Schäden, Feuchtigkeit) lokalisiert, so kommen moderne Frequenz-Umrichter mit Pulsweiten-Modulation (PWM) hoher Taktfrequenz als Ursache in Betracht, wenn sie nicht durch ein Ausgangsfilter entstört sind und wenn die Verbindungsleitung zwischen Umrichter und Motor relativ lang ist (z. B. > 20 m) – siehe Abschnitt 12. Einzelheiten zu diesem komplexen Thema sind [4] zu entnehmen.

4 Windungsschluss

Durch die enormen Fortschritte bei der Qualität von Lackdrähten sind fertigungsbedingte Windungsschlüsse selten geworden, obwohl die Drahtisolierung bei der maschinellen Einziehtechnik wesentlich höher beansprucht wird als bei einer Handwicklung. Windungsschlüsse sind aber als Folgeschäden nach wie vor unausbleiblich, wenn die thermische Grenze der Isolation überbeansprucht wird. Um Ursache und Wirkung abzugrenzen, wird das Thema nachstehend ausführlich behandelt.

4.1 Qualität der Lackdrähte

Der außerordentlich hohe Qualitätsstandard lackisolierter Wickeldrähte wird an den in der Norm geforderten Mindest-Durchschlagspannungen an einem verdrehten „Twist“ deutlich (Tafel 1).

4.2 Definition „Windungsschluss“

Im ungestörten Zustand sind angelegte Spannung ($U \approx E$) und Windungszahl (w) so ausgeglichen, dass der gewünschte Magnetfluss (Φ) ohne Übersättigung des Eisens zustande kommt. Wird dieser Zustand durch einen „Windungsschluss“, also durch eine Verminderung

Tafel 1 Mindest-Durchschlagspannung (eff) von runden Lackdrähten

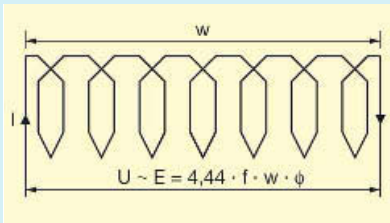
Grad 1 (Einfachlackierung) nach IEC 60317-0-1, Abschnitt 13, Tabelle 9



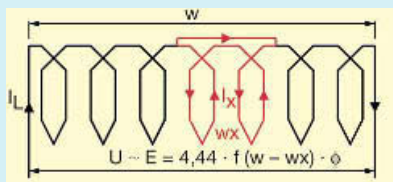
Durchmesser d (mm)	Spannung U (V)
0,25	2200
0,25...0,28	2200
0,28...0,355	2300
0,355...0,45	2400
0,45...0,56	2500
0,56...0,8	2600
0,8...2,5	2700

Autor

Obering. *Helmut Greiner*, Aichwald, war Mitglied in verschiedenen DKE- und IEC-Gremien und ist heute als beratender Ingenieur tätig.



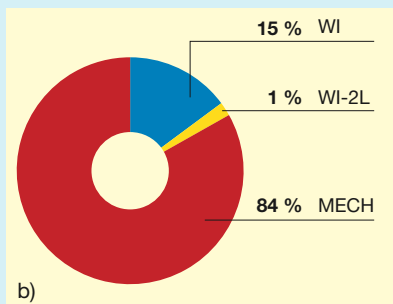
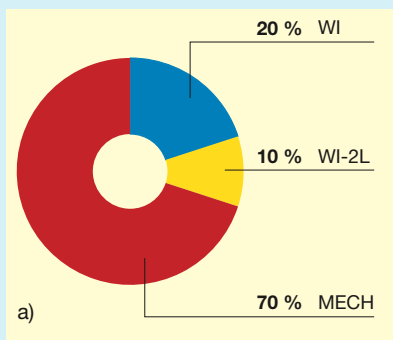
1a Ungestörte Wicklung mit ausgeglichener Verhältnis von Spannung U zur Windungszahl w



1b Windungsschluss mit Überbrückung des Windungsteils w_x ; erhöhte Ströme I_L und I_x



2 Windungsschluss in einem Teil der Spule



3 Anteil der Wicklungsschäden durch Zweileiterbetrieb

- a) 50er bis 70er Jahre
- b) 80er und 90er Jahre

Schätzwert nach repräsentativer Umfrage
 MECH: mechanische Schäden (vorwiegend Lager); WI: Wicklungsschäden; WI-2L: Wicklungsschäden wegen 2-Leiterbetrieb

der Windungszahl um w_x gestört, so treten erhöhte Ströme auf (Bild 1):

- Im Strang und in der Leitung der verhältnismäßig wenig erhöhte Strom I_L statt I wegen vermindertem Widerstand und erhöhter Sättigung (Magnetisierungsbedarf).
- Im kurzgeschlossenen Windungsteil w_x der verhältnismäßig stark überhöhte Strom I_x wegen der durch Selbstinduktion in diesem Spulenteil erzeugten Spannung.

4.3 Schadensbild

Das Schadensbild ist eindeutig: Durch die direkte „Kurzschlussverbindung“ kommt es innerhalb der betroffenen Spule zu hohen Induktionsströmen, die sich je nach ihrer Stärke außen bei den Hauptleiterströmen als erhöhte und unsymmetrische Stromaufnahme abbilden.

Die Erwärmung in der schadhaften Teilspule schreitet sehr viel rascher voran als in den übrigen Spulen. Das Schadensbild zeigt dann auch deutlich eine einzelne, verbrannte Teilspule, während die umgebenden Spulen noch relativ neuwertig aussehen (Bild 2).

Es können sich jedoch auch umgekehrt als Folge einer gleichmäßigen Überlastung alle Spulen gleichmäßig erwärmen, wobei schließlich in irgendeiner Teilspule als Folgeschaden ein Windungsschluss entsteht. Bei einer solchen Wicklung ist im Gegensatz zu Bild 2 eine allgemeine Bräunung aller Spulen feststellbar, während eine – oder auch mehrere – Teilspulen durch die mehr oder weniger ausgeprägten Windungsschlüsse besonders stark verbrannt sind.

4.4 Windungsprüfung als Teil der Endprüfung

Zur Erkennung von eventuellen werkseitigen Windungsschlüssen kann eine „Windungsprüfung“ bei der Endabnahme durchgeführt werden.

Nach der Fertigmontage laufen alle Motoren zunächst gruppenweise im Prüffeld mindestens 1 bis 2 Stunden, davon als Windungsprüfung eine längere Zeit an 1,3-facher Nennspannung. Die erhöhte Spannung hat eine Vergrößerung der Leerlauf-Verluste zur Folge. Auf diese Weise erreicht die Motorwicklung am Ende der Prüfzeit eine Erwärmung, die etwa der Erwärmung im Nennbetrieb entspricht. Im betriebswarmen Zustand und bei erhöhter Windungsspannung kann auf diese Weise eine erneute Prüfung auf Windungsschluss stattfinden. Vor der Harmonisierung mit IEC 60034-1 war diese Prüfung auch Bestandteil von VDE 0530.

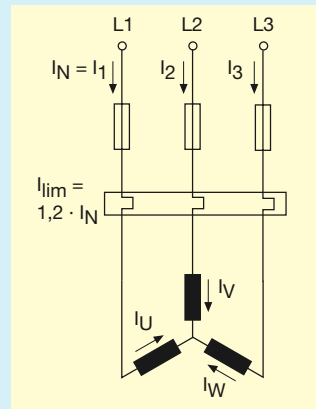
5 Zweileiter-Betrieb

Beim Betrieb von Drehstrom-Kurzschlussläufer-Motoren kommt es immer wieder vor, dass einer der drei Außenleiter ausfällt. Die Ursache hierfür ist meist das Ansprechen

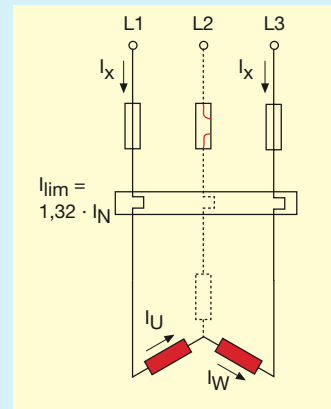
einer Schmelzsicherung beim Einschaltstromstoß, gelegentlich auch schlechter Kontakt in der Leitungsführung oder eine Leitungsunterbrechung. Bekanntlich bleibt ein Drehstrom-Asynchronmotor auch bei Zweileiter-Anschluss mit nahezu voller Drehzahl – wenn auch bei verminderter Kippleistung – mit derjenigen Drehrichtung in Betrieb, in der ihm ein Bewegungsimpuls erteilt wurde oder in der er sich vor der Störung befand.

Schmelzsicherungen sind in elektrischen Anlagen nach DIN VDE 0100 Teil 523 vorgeschrieben. Bei Belastung mit 1,2-fachem Nennstrom – für einen Elektromotor bereits eine gefährliche Überlastung – spricht eine

4 Stromaufnahme bei Dreiphasen- und Einphasenbetrieb in Sternschaltung

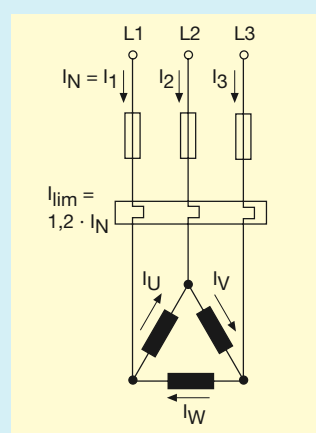


3-Leiterbetrieb, ungestört

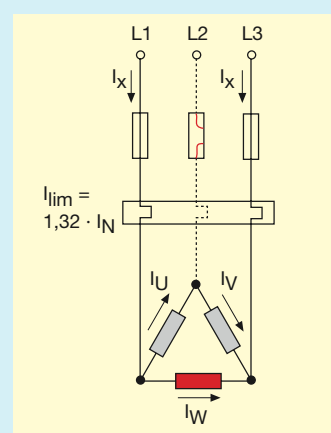


2-Leiterbetrieb, gestört

5 Stromaufnahme bei Dreiphasen- und Einphasenbetrieb in Dreieckschaltung



3-Leiterbetrieb, ungestört



2-Leiterbetrieb, gestört

Schmelzsicherung von der Stärke des Motor-Nennstromes überhaupt nicht an. Bei 6-fachem Nennstrom, der beim Anlauf eines Elektromotors auftreten kann, spricht eine solche Schmelzsicherung in „flinker“ Ausführung bereits nach 0,04 s an, in „träger“ Ausführung nach 0,5 s, in beiden Fällen also vor einem sicheren Hochlauf des Motors. Eine träge Schmelzsicherung von der Stärke des 3-fachen Motor-Nennstromes hingegen hält unter gleichen Bedingungen mindestens 30 s. Da in der Regel nur eine der drei Sicherungen durchschmilzt, kann der Motor an zwei Außenleitern weiterlaufen und ist bei Belastung gefährdet.

Mit Rücksicht auf den Anzugsstrom bei Direkteinschaltung sind Schmelzsicherungen in „träger“ Ausführung für etwa 2- bis 3-fache Nennstromstärke des Motors zu wählen. Die Schmelzsicherung ist als Kurzschlusschutz für die Leitung zu wählen. Den thermischen Überlastungsschutz der Leitung kann das Motorschutzrelais übernehmen. Bei der Auswahl dieser getrennten Schutzorgane ist DIN VDE 0100 Teil 430, Abschnitt 7.2 zu beachten.

Der relative Anteil von Wicklungsausfällen durch Zweileiterbetrieb ist in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen (Bild 3), weil zum Schutz gegen diesen netzbedingten Stö-

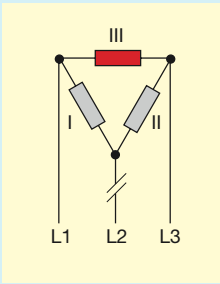
rungsfall mit „phasenausfallempfindlichen“ Motorschutzrelais relativ einfache, preisgünstige und wirkungsvolle Einrichtungen zur Verfügung stehen.

6 Auswirkungen des Zweileiterbetriebs auf die Strangströme

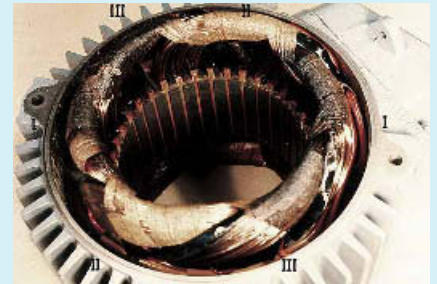
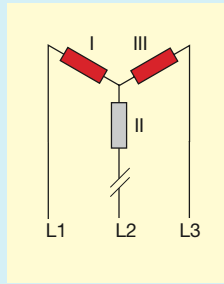
Für die Stromverteilung in den drei Wicklungssträngen des Motors und für die Wirksamkeit des normalen Motorschutzrelais ergeben sich bei den beiden möglichen Schaltungen der Drehstrom-Ständerwicklung unterschiedliche Gesichtspunkte:

6.1 Sternschaltung

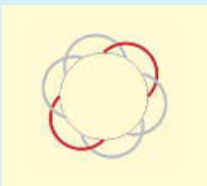
Bei Sternschaltung der Wicklung liegen die in der Netzleitung angeordneten Relais in Reihe mit den zugehörigen Wicklungssträngen, überwachen also direkt den für die Ständererwärmung maßgebenden Strom. Obwohl dieser Strom im ungünstigsten Fall um bis zu 32 % höher sein kann als der Bemessungsstrom, besteht im Allgemeinen keine besonders hohe Gefahr für die Wicklung, da ja ein Wicklungsstrang (also ein Drittel des bewickelten Raumes) ohne Strom ist und einen erheblichen Wärmeausgleich übernehmen kann (Bild 4).



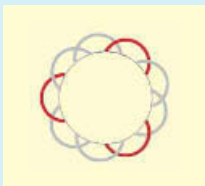
6 Prinzip und Beispiel für das Schadensbild einer 4-poligen Drehstrom-Ständerwicklung nach 2-Leiterbetrieb in Dreieckschaltung (Strang III verbrannt)



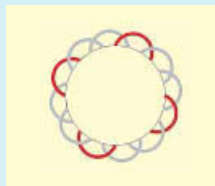
8 Prinzip und Beispiel für das Schadensbild einer 4-poligen Drehstrom-Ständerwicklung nach 2-Leiterbetrieb in Sternschaltung (Stränge I und III verbrannt)



Polzahl: 4

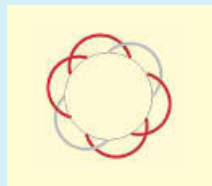


6

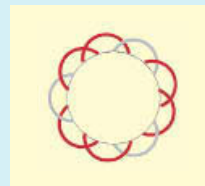


8

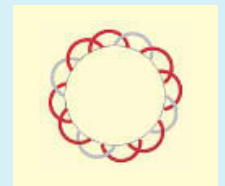
7 Gefährdete Spulen (rot) am Wickelkopf von 4-, 6-, 8-poligen Drehstrom-Ständerwicklungen bei 2-Leiterbetrieb in Dreieckschaltung



Polzahl: 4



6



8

9 Gefährdete Spulen (rot) am Wickelkopf von 4-, 6-, 8-poligen Drehstrom-Ständerwicklungen bei 2-Leiterbetrieb in Sternschaltung

6.2 Dreieckschaltung

Fällt bei der Dreieckschaltung eine Netzleitung aus, so verbleibt ein Wicklungsstrang an voller Spannung, während die beiden anderen Stränge jeweils nur die halbe Nennspannung erhalten. Entsprechend ist auch die Stromaufteilung auf die beiden Zweige wie $2 : 1$ bzw. $2/3 I_N : 1/3 I_N$. Selbst wenn das auf I_N eingestellte Motorschutzrelais nicht mehr als diesen Sollwert dauernd zulassen würde, wäre im gefährdeten Wicklungsstrang mit einem Dauerstrom von $2/3 I_N = 0,67 I_N$ zu rechnen, während dieser Strang nur für $1/\sqrt{3} I_N = 0,58 I_N$ dauernd bemessen ist.

Tatsächlich darf im gestörten Betrieb ein Ansprechstrom bis zu $1,32 I_N$ fließen, d. h. im gefährdeten Wicklungsstrang können dauernd bis zu $1,32 \cdot 0,67 I_N = 0,88 I_N$ auftreten, ohne dass das Relais anspricht. Der Wicklungsstrang wird also mit dem $0,88/0,58 = 1,5$ -fachen zulässigen Strangstrom belastet, was selbst bei einem guten Wärmeausgleich mit den nur zu etwa 75 % ihres Nennwertes belasteten beiden anderen Strängen eine beachtliche Gefährdung darstellt (Bild 5).

Es wurden Wicklungstemperaturen bis zu 140 % der Nennwerte gemessen, wenn der Außenleiterstrom dem Nennstrom entspricht.

7 Typische Schadensbilder von Drehstrom-Ständerwicklungen

Die dargestellten Stromverhältnisse führen zu typischen Schadensbildern, die einen eindeutigen Rückschluss auf die Schadensursache

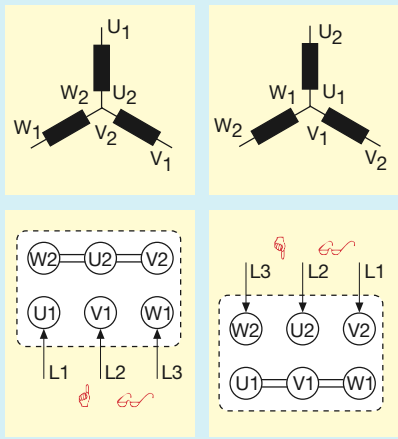
erlauben. Bei entsprechenden Hinweisen an den Betreiber können die Schwachstellen im Netz beseitigt und eine Wiederholung von Wicklungsschäden vermieden werden. Bild 6 zeigt das Prinzip und ein Beispiel für das Schadensbild einer 4-poligen Drehstrom-Ständerwicklung nach 2-Leiterbetrieb in **Dreieckschaltung**. In Bild 7 sind die gefährdeten Spulen am Wickelkopf von 4-, 6-, 8-poligen Drehstrom-Ständerwicklungen bei 2-Leiterbetrieb in Dreieck-Schaltung dargestellt. Die Bilder 8 und 9 zeigen die korrespondierenden Fälle für die **Sternschaltung**.

8 „Falsche“ Sternschaltung

Diese Schaltung wird hier mit aufgeführt, obwohl sie keinen Wicklungsschaden verursacht (Bild 10). Diese bekannte Tatsache verführt jedoch dazu, auch bei der Doppelsternschaltung nach Abschnitt 9 die Sternbrücke ohne Beachtung der Klemmenbezeichnungen einzulegen – mit den dort beschriebenen Folgen.

9 Falsche Doppelsternschaltung

Wenn bei polumschaltbaren Motoren in Dahlanderschaltung (Δ/YY) die Doppelsternbrücke an der falschen Klemmenreihe eingelegt wird, führt dies zu einer thermischen Überlastung von einigen Teilsträngen der Wicklung mit einem ganz spezifischen, rekonstruierbaren Schadensbild (Bild 11).



„Richtige“ Sternschaltung

„Falsche“ Sternschaltung

10 Die „falsche“ Sternschaltung ist zulässig – sie führt nicht zu einem Wicklungsschaden

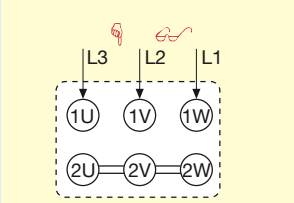
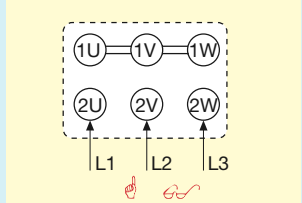
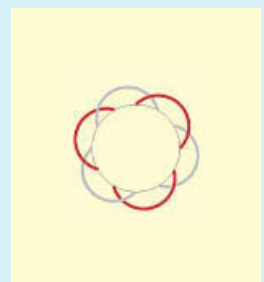
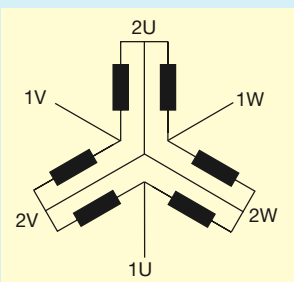
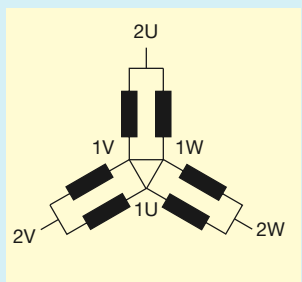
Im Gegensatz zur normalen Sternschaltung ist beim Anschluss unbedingt auf die Klemmenbezeichnung zu achten.

10 Offene Dreieckschaltung (V-Schaltung)

Wenn eine Dreieckbrücke fehlt (z. B. durch losen Kontakt oder schlechte Verbindung an den Kontakten eines Schützes in einer Y/ Δ -Kombination), so ergibt sich ein Schadensbild, das mit 2-Leiterbetrieb in **Sternschaltung** vergleichbar ist. Bei Beachtung der Klemmenbezeichnung ist das Schadensbild ebenfalls eindeutig (Bild 12).

11 Rückschlüsse aus der Schadensstelle

Wiederholte Wicklungsausfälle am gleichen Motor und an der gleichen Stelle der Wicklung



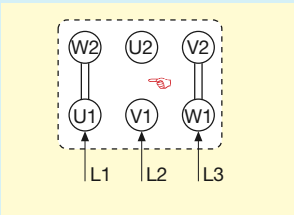
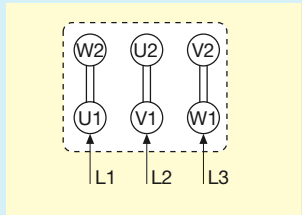
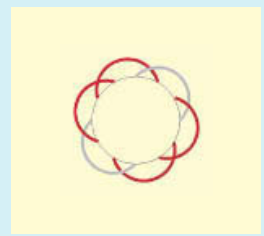
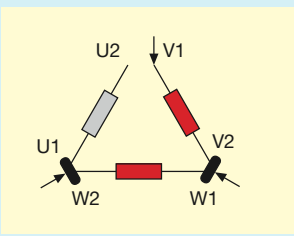
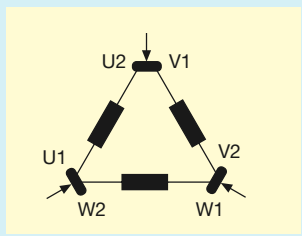
Bei falschem Anschluss (Doppelsternbrücke in der falschen Klemmenreihe) ergibt sich ein spezifisches Schadensbild. Gefährdete Spulen: rot

a) Richtiger Anschluss bei YY

b) Falscher Anschluss bei YY

c) Schadensbild

11 Falsche Doppelsternschaltung



Bei offener Dreieckschaltung ergibt sich das gleiche Schadensbild wie bei 2-Leiterbetrieb in Sternschaltung. Gefährdete Spulen: rot

a) Geschl. Dreieckschaltung

b) Offene Dreieckschaltung

c) Schadensbild

12 Offene Dreieckschaltung (V-Schaltung)

können kaum dem Zufall zugeordnet werden. Es lohnt sich daher, Ursache und Stelle des Schadens zu protokollieren und Konsequenzen zu ziehen, bevor es zu weiteren Wiederholungen kommt. Aus einer Veröffentlichung von *H. W. Rotter* (Siemens AG) ergeben sich interessante Rückschlüsse: „Wenn 70 % der in einem bestimmten Zeitraum von einem Anwender beobachteten Wicklungsfehler im unteren Segment liegen (Bild 13), so ist dies ziemlich sicher der Einwirkung von Wasser oder Feuchtigkeit zuzuschreiben.“

Konsequenzen: Schutzart erhöhen und/oder Dichtungen (vor allem am Klemmenkasten), überprüfen und verbessern.

Gedrängte Raumverhältnisse zwischen Wickelkopf und Lagerschild können bei der nicht zu verhindernden Kondenswasserbildung zu Überschlügen führen. Hier können auch Kondenswasserlöcher nicht helfen. Im Gegensatz zu dem in Bild 14 gezeigten Beispiel werden bei einer guten Konstruktion reichliche Abstände

eingehalten und damit Überschlüge mit Sicherheit vermieden. Aus der gleichen Erhebung stammen die Zahlen für die Verteilung von Wicklungsschäden auf Nut, Nutaustritt und Wickelkopf (Bild 15). Sowohl beim Einlegen der Wicklung von Hand als auch beim Einziehen mit Maschine werden die Wickeldrähte in der Nut und am Nutende am meisten beansprucht. Trotzdem treten nur etwa 11 % der Wicklungsschäden an diesen „gefährdeten“ Stellen auf – alle übrigen am oder im Wickelkopf.

Konsequenzen: Schutzart und Abdichtung gegen Wasser oder Fremdkörper verbessern. Mechanische Beschädigungen bei der Demontage vor Ort oder in der Reparaturwerkstatt vermeiden.

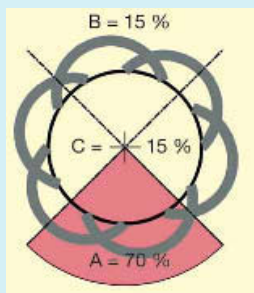
12 Spannungsspitzen aus PWM-Umrichter

Bei Speisung mit PWM-Umrichtern kann es beim Zusammentreffen von ungünstigen Bedingungen wie

- hohe Taktfrequenz
 - hohe Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt
 - kurze Anstiegszeit t_a
 - lange Zuleitung
 - schwache oder geschädigte Isolierung
- zu lokalen Spannungsdurchschlägen zwischen einzelnen Wickeldrähten mit Windungsschluss oder Unterbrechung als Folgeschaden kommen. Der Schaden tritt häufig am Wickelkopf auf und wird durch schlechte Tränklackfüllung zwischen den einzelnen Drähten begünstigt. Ursachen und Abhilfemaßnahmen sind in [4] ausführlich beschrieben.

Literatur

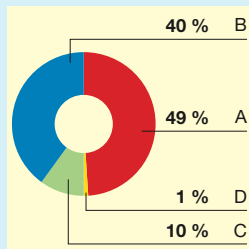
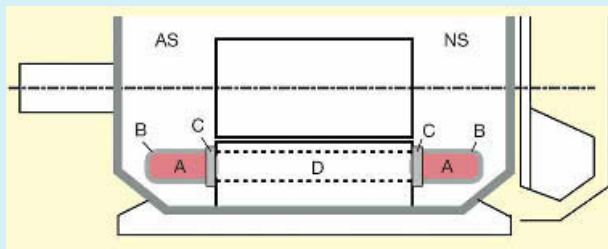
- [1] Greiner, H. u. a.: Vorbeugende Instandhaltung von Elektromotoren und Getrieben. Seminarunterlagen des Haus der Technik e. V., Essen, (2001).
- [2] Greiner, H.: Installation und Instandhaltung von Getriebemotoren. Sonderdruck SD 2496 der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen.
- [3] Greiner, H.: Schutzmaßnahmen bei Drehstrom-Getriebemotoren. Herausgeber: Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen.
- [4] Greiner, H.: UmrichterMotoren. Sonderdruck SD 2996 der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen.
- [5] DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1) Drehende elektrische Maschinen; Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten. ■



13 Verteilung der protokollierten Wicklungsschäden am Umfang (nach H. W. Rotter)



14 Gedrängte Raumverhältnisse zwischen Wickelkopf und Lagerschild



15 Verteilung der Wicklungsschäden auf die Teile einer Ständerwicklung

AS	64 % (wärmere Seite)	NS	36 % (kühlere Seite)
A	im Wickelkopf innen	B	am Wickelkopf außen
C	am Nutaustritt	D	in der Nut