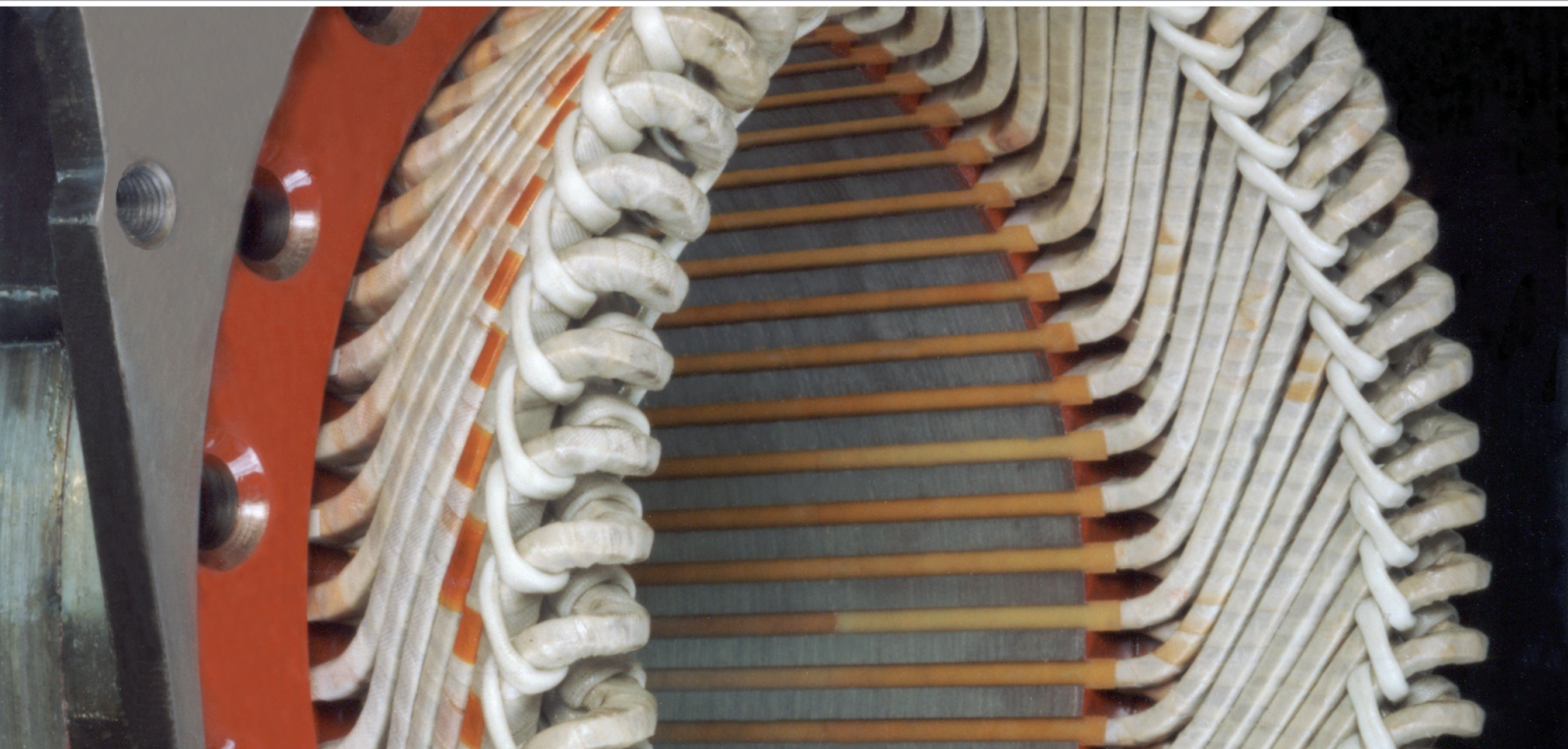


Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200

für umrichter gespeiste Traktionsmotoren
hoher Bemessungsspannung





VEMoDUR-VPI-200

Isoliersystem für umrichtergespeiste Traktionsmotoren hoher Bemessungsspannung

Dr.-Ing. Frieder Kielmann, Dipl.-Ing. Olaf Seener, Dipl.-Ing. Jens Proske

Kurzfassung

In der VEM Sachsenwerk GmbH, Dresden werden seit den 50er Jahren Traktionsmotoren im Spannungsbereich bis 3000 V mit Leistungen bis 1 MW und darüber hergestellt. Bei den heute zu liefernden Drehstrom-Traktionsmaschinen wird die Ständerwicklung als Formspulenwicklung mit dem bewährten VEMoDUR-VPI-200-Isoliersystem ausgeführt. Das Isoliersystem wurde mit dem Ziel, noch höhere Bemessungsspannungen auszuführen und gleichzeitig die Beständigkeit gegenüber den beim Betrieb mit modernen Umrichtern auf-

tretenden impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen nachzuweisen, umfangreichen Eignungstests unterzogen. Dabei wurden insbesondere elektrische Lebensdauerprüfungen mit verschiedenen Wickeldrahtqualitäten durchgeführt und Schlussfolgerungen für deren Einsatzbereiche gezogen. Es konnte an realen Ständerwicklungen mit dem Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 gezeigt werden, dass die Windungsisolierung selbst bei hohen Spannungsbeanspruchungen die heute üblichen Lebensdauerforderungen problemlos erfüllt.

Einführung

Schon in den 60er Jahren waren intensive Bemühungen im Elektromaschinenbau zu verzeichnen, Isoliersysteme zu entwickeln, die eine größere Ausnutzung der elektrischen Maschinen gestatteten und eine höhere thermische Belastung zuließen. Außerdem sollten diese Systeme unempfindlich gegen Feuchtigkeit und Schmutzeinflüsse sein. Diese Entwicklungsrichtung war besonders vom Traktionsmaschinenbau vorangetrieben worden, fand dann aber auch bei thermisch hoch beanspruchten stationären Antrieben Anwendung.

Im Sachsenwerk Dresden wurde damals eine Isolierung der Wärmeklasse H eingeführt, die im Wesentlichen aus Glimmer, Glas und Silikonkautschuk bestand. Der erforderliche Feuchtigkeitsschutz wurde durch mehrmalige Tränkung mit Silikon-

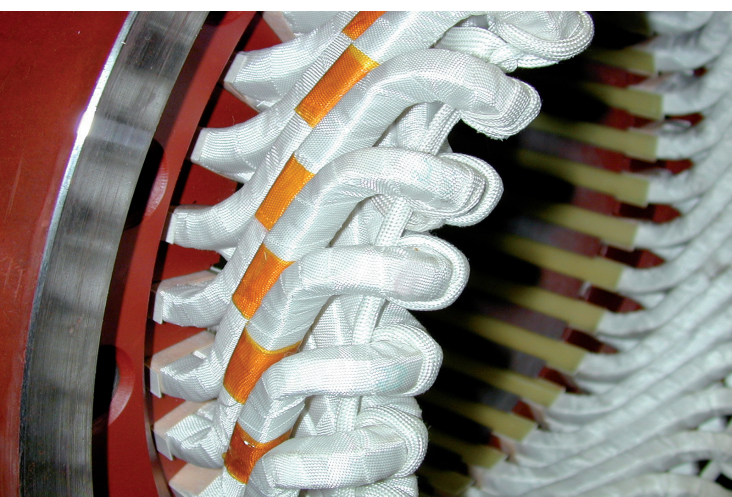
lack (Basis Polykondensationsharz) erreicht. Mehrere Hundert Fahrmotoren dieselektrischer Lokomotiven laufen nach fast 40-jähriger Betriebszeit heute noch mit diesem Isoliersystem des Sachsenwerkes unter tropischen Bedingungen zur vollsten Zufriedenheit des Kunden. Die Entwicklung der additiv vernetzenden Silikonharze in den 70er Jahren war die Voraussetzung für die Einführung von Isoliersystemen der Wärmeklasse H und 200 nach dem in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht wesentlich besseren VPI-Verfahren (Vakuum-Druck-Imprägnierung). Als Material stehen wiederum Glas und Glimmer sowie Polyimidfolie und Flächenisolierstoffe aus aromatischen Polyamidfasern zur Verfügung. Im Sachsenwerk Dresden wurden frühzeitig und in enger Gemeinschaftsarbeit

Eine Welt voller Bewegung

mit den Zulieferern die entsprechenden Entwicklungsarbeiten und Prototypuntersuchungen durchgeführt.

Im Ergebnis dieser Entwicklungsarbeiten wurde das Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 eingeführt und mit großem Erfolg auch unter schwierigen Umweltbedingungen in bisher 600 Lokomotivmotoren (Vollbahnlokomotiven und schwere Industrielokomotiven mit Leistungen von 350...1050 kW und Bemessungsspannungen bis 1800 V) sowie in mehr als 10000 Nahverkehrsmotoren (Drehstromasynchron- und Gleichstrom

motoren für Triebzüge, Stadt- und Straßenbahnen sowie Trolleybussen mit Leistungen von 50...500 kW und Bemessungsspannungen bis 3000 V) eingesetzt. Darüber hinaus findet das Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 ebenfalls in mehr als 1000 Traktionsgeneratoren (dieselelektrische Lokomotiven, Triebzüge und Mining-Trucks sowie für Hilfsbetriebe mit Leistungen von 50...5000 kVA und Bemessungsspannungen bis 2800 V) einen erfolgreichen Einsatz.



www.vem-group.com



VEMoDUR-VPI-200

Isoliersystem für umrichter gespeiste Traktionsmotoren hoher Bemessungsspannung

Beschreibung des Isoliersystems

Das Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 ist insbesondere für den Einsatz in Traktionsmaschinen der Wärmeklasse 200 nach IEC 60349 konzipiert. Die Vorschriften für Traktionsmaschinen berücksichtigen die spezifische Betriebsweise der Traktionsantriebe und -generatoren mit stark wechselnder Belastung und den sich daraus ergebenden Temperaturspielen in der Wicklung. Deshalb werden in IEC 60349 als zulässige Grenztemperatur 240°C bzw. für vollständig geschlossene Maschinen 250°C festgelegt. Traktionsmotoren werden in zunehmendem Maße mit modernen Spannungs-Zwischenkreis-Umrichtern unter Verwendung von IGBT-Halbleitern gespeist. Durch die extrem kurzen Schaltzeiten der Bauelemente entstehen impulsförmige Spannungsspitzen, die abhängig von den Systemparametern (Zwischenkreisspannung, Taktfrequenz, Kabeltyp und -länge) vor allem die Windungsisolierung der Maschinen belasten. Im Folgenden wird über die Beständigkeit des Isoliersystems gegenüber diesen impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen berichtet. Diesen extremen thermischen Anforderungen wird bereits durch die Auswahl der einzelnen Isolierstoffe Rechnung getragen.

Als Hauptkomponenten werden eingesetzt:

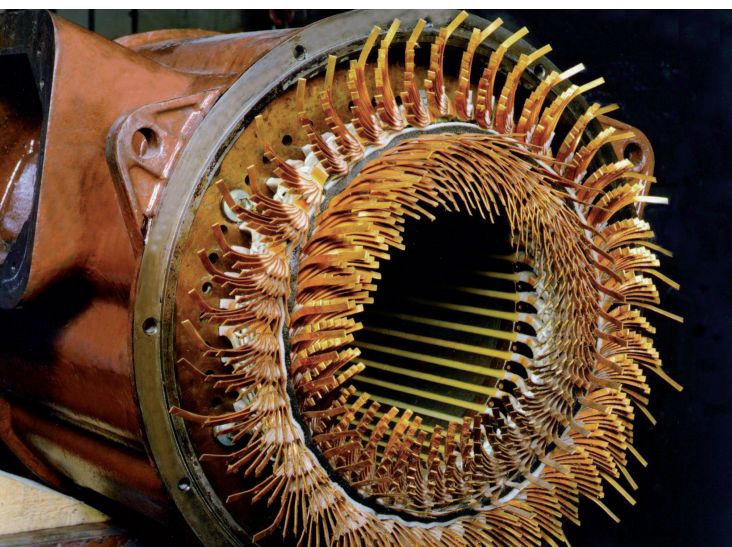
Komponente	Isolierstoff
Isolierung-Wickeldraht (Windungsisolierung)	Polyimidfolie; Polyimidfolie/ Glasseidenumspinnung
Bandeinbindung/Beilagen (Haupt- und Wickelkopfisolierung)	Glimmer-Glasseidenbänder mit aramidfaserverstärktem Glimmerpapier/Flächenisolierstoff aus arom. Polyamid
Tränkmittel	Silikontränkharz (modifiz. Phenyl - Methylharz mit Platinkatalysator)

Tabelle 1

Isoliersysteme mit den genannten Isolierstoffen haben sich wie oben beschrieben seit langem bewährt. In zahlreichen Referenzen werden die hervorragenden thermischen Eigenschaften, insbesondere die hohe thermische Überlastbarkeit dargestellt [1 bis 6]. Für das Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 können die umfassenden Betriebserfahrungen mit einer großen Zahl verschiedener Traktionsmotoren als Nachweis der thermischen Beständigkeit und Zuverlässigkeit herangezogen werden, so dass auf eine gesonderte funktionelle thermische Bewertung, wie sie nach IEC 60034-18 [7 und 8] üblich ist, verzichtet werden kann. Zur Ermittlung der nachfolgend beschriebenen elektrischen Lebensdauer der Windungsisolierung wurde unter Serienbedingungen ein Versuchsstand mit Formspulen, die stirnseitig aufgeschnittene Windungen haben, gefertigt (Bild 1). Die Schnittstellen wurden vor dem Tränkprozess angebracht und die zwangsläufig zwischen den einzelnen Windungen entstehenden Zwickel mit einem speziellen Tränkharz gefüllt.

Die Isolierung der Wickeldrähte (Windungsisolierung) ist innerhalb desselben Versuchsständers sowohl mit Polyimidfolie (Kapton/FN) als auch in Kombination mit einer Glasseidenumspinnung ausgeführt, um damit einen unmittelbaren Vergleich zwischen diesen beiden Qualitäten durchführen zu können. Die Hauptisolierung im Nut- und Wickelkopfteil wurde mit Glimmer-Glasseidenbändern mit aramidfaserverstärktem Glimmerpapier gewickelt und im VPI-Prozess mit Silikonharz getränkt. Die Isolierungsdicke wurde über die Lagenzahl des Isolierbandes abhängig von der Bemessungsspannung des Traktionsmotors dimensioniert. Die Bemessungsspannung des Versuchsmotors beträgt 1200 V. Alle eingesetzten Isolierstoffe erfüllen vollständig die in den Technischen Lieferbedingungen der VEM vereinbarten technischen Kennwerte.

Eine Welt voller Bewegung



(Bild 1) Versuchsstände

Nachbildung der Umrichterbeanspruchung

Die Auswirkungen der Impulsspannungsbeanspruchung auf die Windungsisolierung von Niederspannungsmaschinen mit reinen Lackdrahtwicklungen wurden bereits eingehend untersucht [9 bis 11]. Es wurde festgestellt, dass insbesondere bei den umrichtertypischen Anstiegszeiten der Spannungsimpulse von einigen Hundert ns durch ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Wicklung elektrische Überlastungen der Windungsisolierung auftreten können. Die elektrische Überlastung

kann je nach Amplitude und Taktfrequenz (Häufigkeit) der Spannungsimpulse zu einer unzulässigen Reduzierung der Lebensdauer führen. Als besonders kritisch muss die Existenz von Teilentladungen infolge der elektrischen Überlastung bewertet werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde die 1992 herausgegebene Grenzkennlinie der zulässigen Impulsspannung an den Motorklemmen im Beiblatt 2 zur DIN VDE 0530 bald wieder überarbeitet [12].

Für Maschinen mit Formspulenwicklungen und höheren Bemessungsspannungen waren bis dahin keine allgemeingültigen Untersuchungsergebnisse bekannt. Es wurden lediglich Grenzkennlinien der zulässigen Impulsspannung für derartige Isoliersysteme veröffentlicht, die eher den Charakter einer statistischen Erhebung haben und nicht genormt sind [13]. Als höchste zulässige Impulsspannung wird dort unabhängig von der Anstiegszeit der Impulse und ohne Beschreibung der Windungsisolierung 1,85 kV angegeben.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass Traktionsmaschinen und damit auch deren Isoliersysteme nicht zum Geltungsbereich der IEC 60034-1 und der nachgeordneten Normen für die funktionelle Bewertung der Isoliersysteme IEC 60034-18 gehören. Dennoch wurde für das Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 frühzeitig eines der wichtigsten Prinzipien der funktionellen Bewertung bei Umrichterantrieb, die Lebensdauerprüfung mit umrichtertypischen Parametern, angewendet. Dieses Prinzip hat zwischenzeitlich Eingang in die Norm IEC 60034-18-42 [14] gefunden und gewährleistet für die sogenannten Isoliersysteme vom Typ II, bei denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass in Folge der Umrichterbeanspruchung Teilentladungen im Betrieb der Maschine auftreten können, die Langzeitbeständigkeit gegenüber den erhöhten elektrischen Beanspruchungen.



VEMoDUR-VPI-200

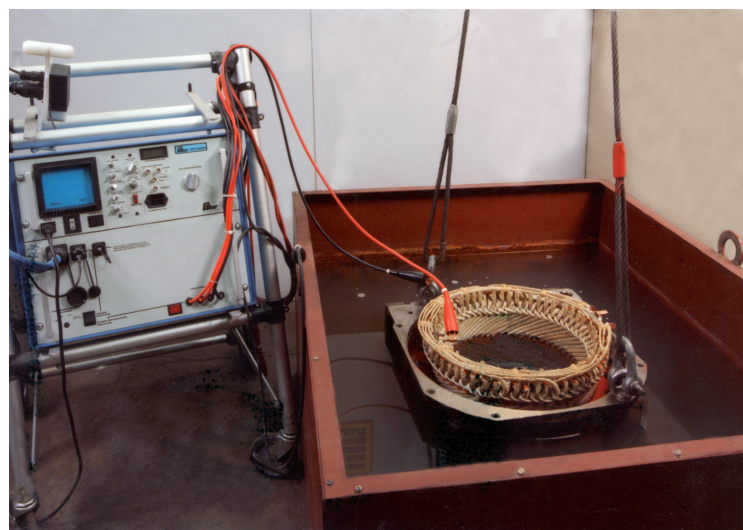
Isoliersystem für umrichter gespeiste Traktionsmotoren hoher Bemessungsspannung

Es stand also die Frage nach der zulässigen elektrischen Beanspruchung durch die Umrichter, insbesondere auch aufgrund der Tatsache, dass international die sogenannte „Glimmbeständigkeit“ der Polyimidfolie stark diskutiert wird. In [9] ist gezeigt, wie die elektrische Lebensdauer der Windungsisolierung von der Spannungsform abhängt. Die Unterschiede zwischen unipolarer Impulsspannung, 50 Hz-Wechselspannung und realer Umrichterbeanspruchung sind jedoch unterhalb der Teilentladungseinsatzspannung gering. Die hier vorgestellten Lebensdauerprüfungen wurden deshalb mit 50 Hz-Wechselspannung durchgeführt und über die Anzahl der bis zum Durchschlag der Windungsisolierung einwirkenden Halbwellen auf die Lebensdauer bei Umrichterbeanspruchung umgerechnet.

Ergebnisse/Vorprüfungen

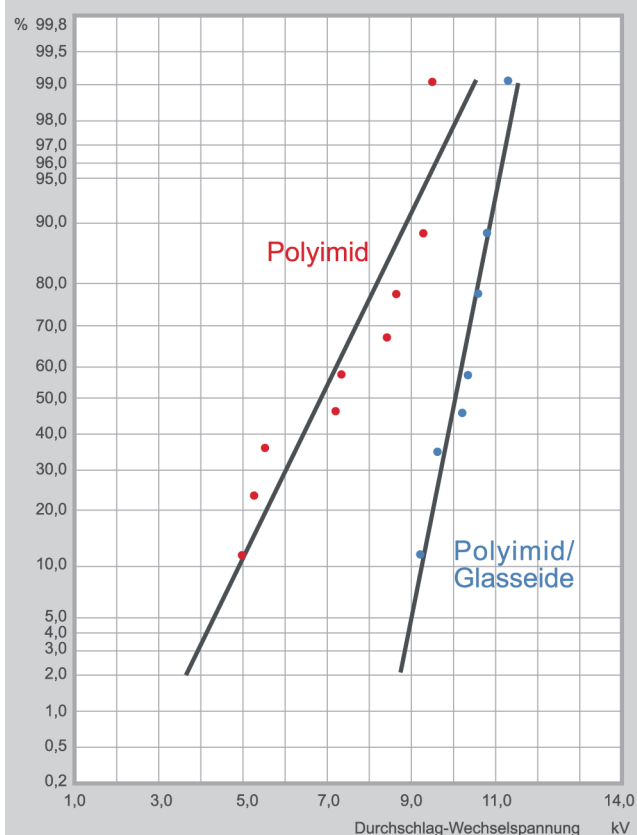
Die Versuchs-Ständerwicklung wurde unter Serienbedingungen gefertigt und hat alle serienmäßigen elektrischen Wicklungsprüfungen und eine zusätzliche Unterwasser-Typprüfung (Bild 2) bestanden. Anschließend wurde die Verteilungsfunktion der Durchschlagwechselspannung zwischen zwei benachbarten Windungen im Spannungssteigerungsversuch gemessen. Eine gegenseitige Beeinflussung aufeinanderfolgender Durchschlagversuche wurde dadurch ausgeschlossen, dass jeweils eine dazwischen liegende Windung unbeanspruchung blieb. Die Verteilungsfunktionen der Durchschlagwechselspannung (Bild 3) können für beide Wickeldrahttypen mit einer Normalverteilung angenähert werden. Die mittlere Durchschlagwechselspannung beträgt für die Drähte mit reiner Polyimidfolie 6,8 kV und für Drähte mit zusätzlicher Glasseidenumspinnung

10 kV. Diese Werte liegen weit über den Betriebsbeanspruchungen und bestätigen einen fehlerfreien Ausgangszustand. Von diesem Ergebnis wurden für jeden Drahttyp drei verschiedene Prüfwechselspannungen für die Lebensdauerprüfungen abgeleitet und als Konstantspannungen bis zum Durchschlag der einzelnen Windungen angewandt. Die Lebensdauerprüfungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, da die hervorragenden thermischen Eigenschaften des Isoliersystems VEMoDUR-VPI-200 durch Betriebserfahrung bestätigt sind (s. Abschn. Beschreibung des Isoliersystems).

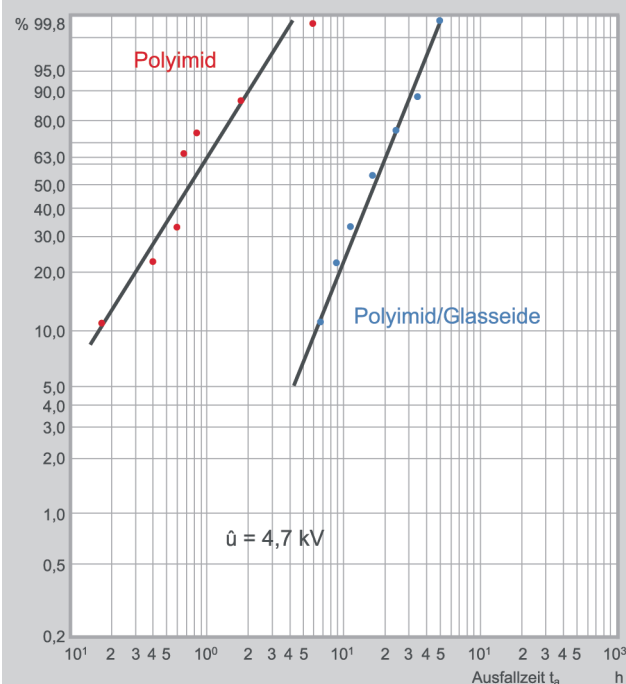


(Bild 2) Unterwasser-Typprüfung

Eine Welt voller Bewegung



(Bild 3) Summenhäufigkeit der Windungs-Durchschlagsspannung



(Bild 4) Summenhäufigkeit der Ausfallzeit



VEMoDUR-VPI-200

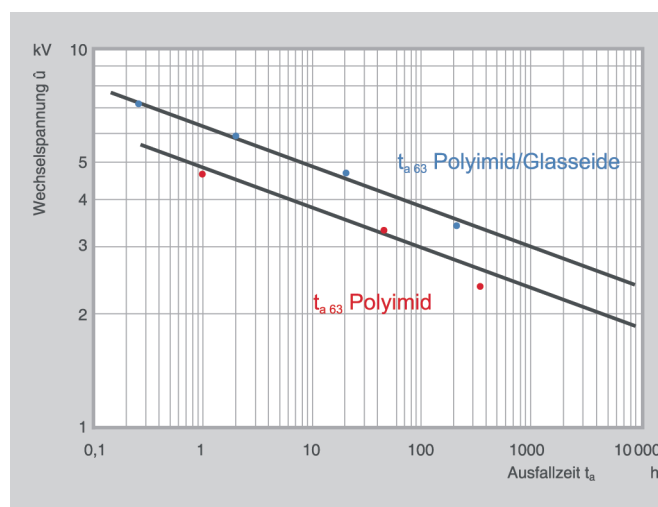
Isoliersystem für umrichter gespeiste Traktionsmotoren hoher Bemessungsspannung

Elektrische Lebensdauer

Zur statistischen Auswertung der Ausfallzeiten der Windungsisolierung wurde wie üblich die Weibullverteilung benutzt. Eine der ausgewählten Prüfspannungen wurde für beide Drahttypen gleich hoch gewählt ($\hat{u} = 4,7$ kV). Es ist zu erkennen, dass die mittlere Ausfallzeit der Wickeldrähte mit reiner Polyimidfolie - wie aus dem Ergebnis des Vorversuches zu erwarten war - bei dieser Beanspruchung relativ niedrig liegt (Bild 4). Wickeldrähte mit zusätzlicher Glasseidenumspinnung haben dagegen eine deutlich höhere mittlere Ausfallzeit ($t_{a,63} = 20$ h). Aus derartigen Verteilungsfunktionen bei Prüfspannungen im Bereich $\hat{u} = 2,3 \dots 7,2$ kV wurden die mittleren Ausfallzeiten in das Lebensdauerdiagramm übertragen (Bild 5). Die Lebensdauererkennlinien sind im doppelt logarithmischen Maßstab parallelaufende Geraden mit dem Anstieg (Lebensdauerexponenten) $n = 9$, d.h., für beide Wickeldrahttypen gilt annähernd der gleiche Alterungsmechanismus.

Offenbar bestimmt die Polyimidfolie den Alterungsverlauf und die Glasseidenseidenumspinnung erhöht nur den Lageparameter der Lebensdauererkennlinie. Für Epoxidharz-Isolierungen von Hochspannungsmaschinen wird vergleichsweise ein Lebensdauerexponent von $n = 9,5$ angegeben [15]. Damit verläuft die elektrische Alterung der Windungsisolierung im Isoliersystem VEMoDUR-VPI-200 ähnlich wie bei anderen Isoliersystemen drehender elektrischer Maschinen und es kann aus der Tatsache, dass sich der Alterungsmechanismus bis zur höchsten angewandten Prüfwechselspannung nicht ändert, geschlossen werden, dass die Polyimidfolie bei diesen hohen Beanspruchungen nicht progressiv - etwa durch die Existenz von Teilentladungen abgebaut wird. Die elektrische Alterung ist mit der Beziehung $U_d = k_d \cdot t_a^{-1/n}$ (k_d = Lageparameter) berechenbar.

Zur Vorausberechnung der zulässigen Umrichterbeanspru-

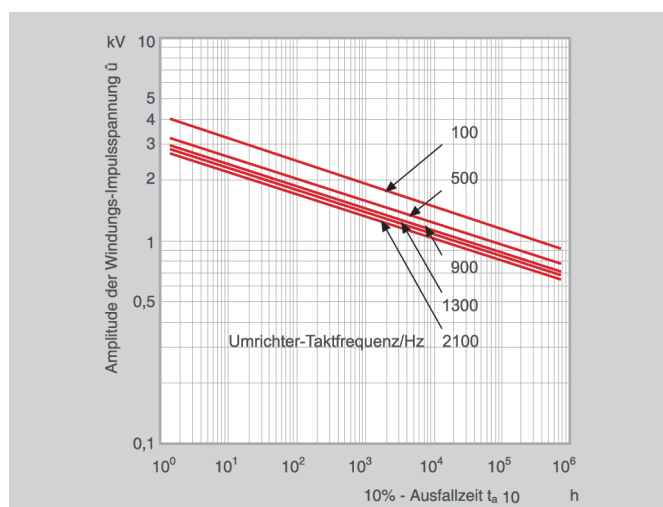


(Bild 5) mittlere Ausfallzeit bei 50 Hz

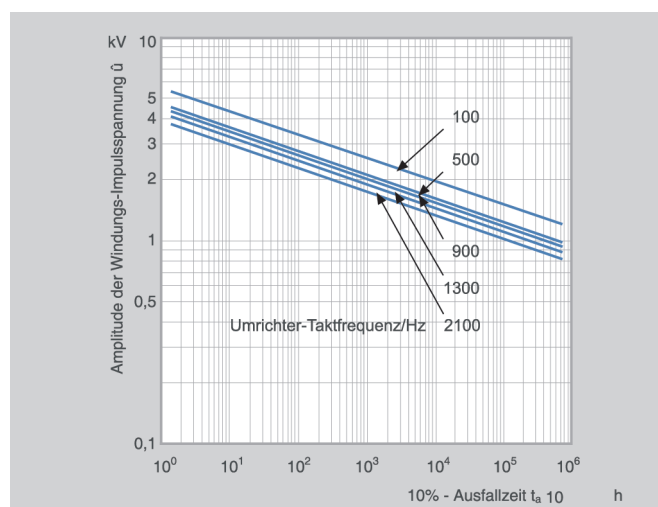
chung für die Windungsisolierung wurde analog zu Bild 3 die Lebensdauererkennlinie für die 10%-Quantile der Verteilungsfunktion ermittelt und daraus die Anzahl der bis zum Durchschlag wirkenden Halbwellen berechnet. Durch Division mit der Umrichtertaktfrequenz als Maß für die Häufigkeit der Impulsspannungsbeanspruchung erhält man neue Lebensdauererkennlinien mit der Umrichtertaktfrequenz als Parameter (Bilder 6 und 7). Als Umrichtertaktfrequenzen wurden die für Traktionsmaschinen relevanten Werte im Bereich von 100 Hz bis ca. 2 kHz in Betracht gezogen.

Aus den auf 30 Jahre ununterbrochenen Betrieb extrapolierten Lebensdauererkennlinien für die Umrichterbeanspruchung ist zu erkennen, dass die zulässigen Windungsspannungen für

Eine Welt voller Bewegung



(Bild 6) Lebensdauer der Polyimid-Windungs-Isolierung



(Bild 7) Lebensdauer der Polyimid-Glasfaser-Windungs-Isolierung

den Wickeldrahttyp mit reiner Polyimidfolie (Bild 6) etwas unter 1 kV und für den Wickeldrahttyp mit zusätzlicher Glasfaserumspinnung (Bild 7) bei 1 kV liegen.

Schlussfolgerungen

Das an einer Ständerwicklung mit dem Isoliersystem VEMO-DUR-VPI-200 erreichte Versuchsergebnis zeigt, dass bei Einhaltung einer strengen technologischen Disziplin in der Wicklungsfertigung auch mit Standard-Wickeldrähten auf Basis Polyimidfolie Typ FN (FEP) eine hohe Beständigkeit gegenüber den elektrischen Umrichterbeanspruchungen gegeben

ist. Für höhere Bemessungsspannungen steht der Wickeldraht mit zusätzlicher Glasfasersumspinnung zur Verfügung. Unter Beachtung der an den Klemmen des Traktionsmotors zu erwartenden Impulsspannung und der in der Wicklung vorhandenen Spannungsverteilung wird die elektrische Lebensdauer berechenbar.

Dabei haben Formspulenwicklungen mit Flachdrähten gegenüber Träufelwicklungen mit Runddrähten den Vorteil, dass die tatsächliche Windungsspannung auch innerhalb einer Spule bekannt ist und für die Berechnung der elektrischen Lebensdauer zugrunde gelegt werden kann.



VEMoDUR-VPI-200

Isoliersystem für umrichter gespeiste Traktionsmotoren hoher Bemessungsspannung

Referenzen

[1] von Roll Isola

„Kapton-isolierte Drähte - ein sicheres System“, Firmenschrift Schweizerische Isola-Werke, 1989, S.1-8.

[2] H.P. Mayer, W. Sorg

„Kapton Polyimid: Folie mit außergewöhnlichen Eigenschaften“, Industrie Service Ausgabe 12/90, S. 32-34, 37.

[3] B. Haberthür

„VPI for Class H Traction-Motors“, IEEE, 1983, pp. 406-413.

[4] F. Galliker

„Bauformen der BBC-Fahrmotoren für alle kommenden Zugförderungsarbeiten“, Brown Boveri Mitt. 12/84, S. 545-557.

[5] H.P. Mayr, D. Stone

„Fortschrittliche Isoliersysteme für die Fahrmotoren moderner Hochgeschwindigkeitszüge“, eb – Elektrische Bahnen 92, 1994, S. 48-50.

[6] H. Brandes

„Tränkmittel in der Elektroindustrie“, Firmenschrift von Roll Isola, 1995, S. 1-10.

[7] IEC 34-18-1: „Functional evaluation of insulation systems for rotating electrical machines

Part 1: General guidelines“, 1992-02, pp.1-45.

[8] IEC 34-18-31: „Functional evaluation of insulation systems for rotating electrical machines

Section 31: Test procedures for form-wound windings – Thermal evaluation and classification for insulation systems used

in machines up to and including 50 MVA and 15 kV“, 1992-07, pp. 1-27.

[9] M. Kaufhold

„Elektrisches Verhalten der Windungsisolierung von Niederspannungsmaschinen bei Speisung durch Pulsumrichter“, Diss., TU Dresden, 1994, Fortschr. Ber. VDI-Reihe 21 Nr. 172. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

[10] M. Berth, M. Eberhardt, J. Speck

„Potential Grading and Wave Parameters of Winding Phases of Induction Motors“, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 20.08. - 01.09.95.

[11] M. Berth, M. Eberhardt, M. Kaufhold, J. Speck, H.

Auinger „Elektrische Belastung und Ausfallverhalten der Wicklungsisolierung von Asynchronmaschinen bei Umrichterspeisung“, ELEKTRIE Berlin 49, 1995, 8/9.

[12] DIN VDE 0530 Beiblatt 2 (VDE 0530 Beiblatt 2) 04.94 (IEC 34-17-1992)

„Drehende elektrische Maschinen; Leitfaden für den Einsatz von umrichter gespeisten Induktionsmotoren mit Käfigläufer; Identisch mit IEC 34-17; 1992 (Report), (Abschnitt 9: Lebensdauer des Isoliersystems).

[13] E. Persson

„Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors“, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 28, No. 5, Sept./Okt. 1992.

Eine Welt voller Bewegung

[14] IEC/TS 60034-18-42 Ed.1

Rotating electrical machines – Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant machines fed from voltage converters

[15] Quint, R. Schuler, N. Didzun, F. Stobbe

„Entwicklungsstand der Isolationstechnologie bei rotierenden elektrischen Hochspannungs-Maschinen“, ETG - Fachtagung, Würzburg 09/94, S. 101-114.



Erste Ausgabe veröffentlicht in der Fachzeitschrift „eb-Elektrische Bahnen“ 95 (1997) 4/ R. Oldenbourg Verlag GmbH / S.100-105

www.vem-group.com

VEM Sachsenwerk GmbH

Pirnaer Landstraße 176

01257 Dresden

Germany

Telefon: +49-(0)351-208-0

Telefax: +49-(0)351-208-1028

E-Mail: sachsenwerk@vem-group.com

Internet: www.vem-group.com



Eine Welt voller Bewegung