

Ein neues Verfahren zur automatischen Gewinnung der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung an elektrischen Wicklungen mit PWM Frequenzumrichterspeisung nach IEC TS 60034-18-41 und IEC TS 61934

Reimar Mannhaupt, RM Prüftechnik GmbH, Nürnberg, Deutschland, rm@rm-prueftechnik.de

Kurzfassung

Beim Betrieb von elektrischen Maschinen an Steuerungen mit steilen Spannungstransienten wie z.B. modernen PWM Umrichtern werden besonders die Eingänge der Wicklungen mit überhöhten Spannungspotenzialen beaufschlagt. Dabei können Teilentladungen auftreten, die die Lebensdauer der Wicklungen drastisch verkürzen. Hierzu gibt es verschiedenste Veröffentlichungen, welche auch die Einflussparameter auf diese Effekte beschreiben.

In der Praxis mangelte es bisher an einem effektiven automatischen Prüfverfahren, welches diese Beanspruchungen simuliert und somit als Werkzeug in Entwicklung, QS und vorbeugender Instandhaltung verwendbar ist. Klassische, auf Wechselspannungsspeisung basierende TE- Systeme bilden diese Wirkungsweisen unzureichend nach. Vorhandene online - Methoden werden durch den systembedingt vorhandenen Noisepegel sowie das nur sporadisch auftretende TE-Signal als in der Praxis schwierig anwendbar bewertet.

Das vorgestellte offline Prüfsystem basiert auf einem programmierbaren, prozessorgesteuerten Stoßimpulsgenerator mit sehr kurzer Impulsanstiegszeit (Bereich 100ns) sowie einem neuartigen Bandpass- Mikrowellensensor mit spezieller Filter- und Signalqualifizierungsbaugruppe. Um den störenden Einfluss typischer VHF/UHF Frequenzen der Prüfumgebung auszublenden und gute Signalsicherheit und –Reproduzierbarkeit zu erreichen, wurde eine sehr schmalbandige Filterung im 1,8 GHz Band gewählt. Während der Beaufschlagung mit repetierenden und automatisch inkrementierenden Spannungsimpulsen erfasst der Flächensensor das Streufeld der Wicklung und filtert die sehr hochfrequenten elektromagnetischen Wellen, die von den Teilentladungen ausgehen, zuverlässig heraus.

Das Signal wird qualifiziert und per Hüllkurvenmethode graphisch eingeblendet und ausgewertet. Eine indirekte Quantifizierung der TE Ladungsmenge erlaubt die Festlegung von Toleranzgrenzen und damit Anwendung in der Serienfertigung.

1. Einleitung

Beim Betrieb von Motoren und Generatoren an Steuerungen mit steilen Spannungstransienten (du/dt) wie z. B. modernen PWM Umrichtern werden die Wicklungen mit überhöhten Spannungspotenzialen beaufschlagt. Dabei können Teilentladungen auftreten, die die Lebensdauer der Wicklungen drastisch verkürzen. Hierzu gibt es in der Literatur verschiedenste Veröffentlichungen, welche auch die unterschiedlichen Einflussparameter auf diese Effekte beschreiben.

Als Hauptursache für die Überhöhung wird eine Interferenz mit der reflektierenden Wellenfront aufgrund des Impedanzunterschiedes zwischen Kabel und Maschine genannt. Ab etwa 20 m wird von kritischen Verhältnissen gesprochen, da hier bereits eine Überhöhung auf das Doppelte der Zwischenkreisspannung des Umrichters möglich ist.

Auch Maßnahmen zur Vermeidung dieser Effekte oder Bekämpfung der möglichen Auswirkungen (Verwendung von Filterelementen am Umrichteranschluss und gezielter Einsatz neuer Isoliermaterialien, insbesondere der Lackdrahtisolierung) sind hinlänglich bekannt und erprobt.

Dieses Problem kann auch von entscheidender Bedeutung für die Lebensdauererwartung der Motoren im Antriebsstrang von E- Fahrzeugen sein, da die Antriebe hier besonders dynamisch regeln und Randbedingungen wie Temperaturschwankungen und

Vibrationen die Lebensdauer der Isoliersysteme weiter beeinträchtigen können.

Da es ein Defizit bei einer vergleichbaren Qualifizierung der Isoliersysteme für derartige Anwendungen gab, wurde 2006 IEC (TS) 60034-18-41 als Leitfaden herausgegeben (auch als VDE 530-18-41 vorhanden). Es wird festgestellt, dass die größte Beanspruchung von einer Kombination aus hohem Spitzenpegel und Anstiegsgeschwindigkeit der Impulse (du/dt) ausgeht, da der Großteil der Spannungen an den Eingangswindungen abfällt und damit sowohl die Phasen-, Windungs- als auch die Masseisolation unsymmetrisch beansprucht.

Der relativ kleine Drahtquerschnitt bei klassischen Niederspannungswicklungen begünstigt das Auftreten hoher Feldstärken z. B. in den unvermeidlichen Luftfehlern einer Träufelwicklung.

Isolierungen werden nach Beanspruchungsklassen sortiert und der Schweregrad der zu erwartenden maximalen Spannungsamplitude in 4 Kategorien unterteilt.

Beispiel: ein 690V Motor hat eine Zwischenkreisspannung von 975V. Durch Überhöhung auf das 2-fache in der Kategorie "starke Beanspruchung" würde eine solche Maschine Spitzenamplituden von über 2 kV ausgesetzt. Die Maschine muss diese weitgehend teilentladungsfrei verkraften, um einen Frühausfall zu vermeiden. In den letzten Jahren wurden gerade an 690 V Maschinen im ungefilterten Umrichterbetrieb häufiger Wicklungsausfälle registriert.

Somit ergibt sich Motivation für Typen- und Chargentests an Maschinen für impulsbehaftete Anwendungen. In der Praxis mangelte es bisher an einem effektiven – möglichst automatischen – Prüfverfahren, welches diese Beanspruchungen simuliert und somit als effektives Werkzeug in Entwicklung, QS und ggf. auch vorbeugender Instandhaltung verwendbar ist.

Klassische, auf Wechselspannungsspeisung basierende TE- Systeme bilden o. g. Wirkungsweisen völlig unzureichend nach, da bei weitem nicht das geforderte du/dt zur Simulation erreicht wird.

In /1/ wird beschrieben, dass die Lebensdauer der Leiter-Erde und der Windungsisolation nicht jedoch die der Phase-Phase Isolation von der Anstiegszeit der Impulse beeinflusst wird. Unabhängig davon kommt für die Verwendung der klassischen Verfahren mit 50Hz Spannungsspeisung jedoch erschwerend hinzu, dass viele Motoren im Moment der möglichen Prüfung bereits intern verschaltet sind.

Diesen Verfahren bleibt also lediglich die Qualifizierungsprüfung an Probeisolationen (z. B. Motoretten und Drahttwists) vorbehalten; ggf. noch einer Gegenprüfung der Leiter-Erde Isolation, da eine exakte Trennung der Quelle der TE bei den nachfolgend beschriebenen Verfahren z. T. schwierig ist.

Bei den TE Einsatzpegeln an galvanisch getrennten Wicklungsteilen wurde empirisch festgestellt, dass diese bei unipolarer Impulsspannung (Scheitelwert) ca. beim 2-fachen Pegel von Wechselspannung (Effektivwert) liegen.

2. Übersicht über vorhandene Prüfverfahren

2.1 Grundsätzliche Methoden und deren Vorteile/Nachteile

Es gibt auf dem Markt bisher wenige, auf Impulsbeanspruchung spezialisierte Systeme und Verfahren, um entsprechend VDE 530-18-41 über die klassische Prüfung an Probeisolationen mit Wechselspannungsspeisung hinauszukommen. Prinzipiell werden etwa 3 Verfahren unterschieden:

- Kapazitive Auskoppelung: begrenzt durch die festgelegte Spannungsfestigkeit des Koppelkondensators, Frequenzgang im mittleren MHz Bereich. Ein solches System wird u. a. in /2/, /3/, /4/ beschrieben. Störungen können gut gefiltert werden.
- Stromwandler (HFCT): nicht vollständig entstörbar, Frequenzgang begrenzt. Prüfling muss von Masse separierbar sein, wenn Sensor in LV Pfad ist.
- Berührungslose Erfassung durch HF-Antennen: in der Regel störungsempfindlich, in der Bandbreite nahezu unbegrenzt.

Eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen an ein System für diese Anwendung liefert IEC TS 61934.

/1/ stellt fest, dass ein Problem die oft unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Systeme sind und dass generell ein hoher „Noise Floor“ der Sensitivität Grenzen setzt.

An die Gerätetechnik werden andere Anforderungen gestellt als an klassische TE- Systeme. Da das du/dt zwischen 5 und 50 $kV/\mu s$ liegt, muss das System auch Signale erfassen, die im hohen MHz Bereich angesiedelt sind. Frequenzen im Bereich der Anstiegszeit der Spannungsimpulse können nicht zum Nutzsignal gehören und müssen herausgefiltert werden. Damit gibt es beim klassischen kapazitiven Verfahren das Problem, dass die auszuwertenden Frequenzen sich z. T. in der Größenordnung des Spannungsstoßes befinden und dieser ungedämpft die nachgeschaltete Signalverarbeitungselektronik schädigen würde /2/.

2.2 Online - Offline ?

Zur Zustandsüberwachung an Mittel- und Hochspannungswicklungen, bei denen TE zu erwarten sind, bieten sich **online** Systeme an. Da unter Realbedingungen gemessen wird, ist die Quantität und die Stärke des Signals das Maß für die Beurteilung des Isolationszustandes. Bei PWM Umrichterspeisung im Niederspannungsbereich muss entweder von sehr wenig oder keinen auftretenden TE bei gleichzeitig hohem Störsignalanteil ausgegangen werden. Ein sehr interessantes Verfahren mit Ringantenne wird in /5/ beschrieben. Da jedoch nur online gearbeitet wird, ist keine Abschätzung der „Reserven“ des Isoliersystems oder des Alterungsverlaufes durch gezielte Überhöhung des Spannungspegels möglich.

Bei **offline** Verfahren wird mit einem Sinus- oder Rechteckgenerator im kHz Bereich oder mit Stoßspannungsimpulsen zur Simulation gearbeitet. Jedoch kann ein Sinusgenerator die extremen du/dt Werte im Impulsbetrieb bei weitem nicht nachbilden (müsste im MHz Bereich arbeiten und würde die Wicklung bei längerer Prüfdauer überlasten). Da bei diesen Systemen die Spannung normalerweise stufenlos geregelt werden kann, ist eine Bestimmung der TE- Einsetz- und Aussetzspannung und damit Beurteilung des Isolationszustandes kompletter Wicklungen leicht möglich. Außerdem unterliegen offline Systeme geringeren Störungsbeeinflussungen.

3. Neues TE- Erfassungssystem mit Mikrowellensensor (MWS)

3.1 Konzept

Die neue Entwicklung basiert auf einem Konzept, welches vor einigen Jahren von Mitsubishi Electric erarbeitet wurde. Für die zustandsorientierte Überwachung von Turbogeneratoren und großen Hochspannungsmotoren werden normalerweise zur TE-Erfassung Buskoppler (kapazitiv) oder Nutkoppler (resistiv / induktiv) als Sensorik eingesetzt. Nachteil ist, dass die Nachrüstung dieser Systeme an älteren Maschinen mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Wesentlich einfacher wäre das Anbringen kontaktloser Sensorik (Antennen). Nachteil solcher Systeme war

bisher stets eine relative Signalunempfindlichkeit bei gleichzeitiger großer Störfempfindlichkeit.

/6/ und /8/ beschreiben ein neuartiges System mit einer kleinen flachen Rahmenantenne (Bandbreite 1,5 - 3 GHz) und einer nachgeschalteten Filter- und Signalverarbeitungsbaugruppe. Untersuchungen bei laufender und abgeschalteter Maschine zeigten, dass im Frequenzband zwischen 1,5 und 1,9 GHz sowohl noch ausreichend Signalstärke der Mikrowellen, die von den auftretenden TE ausgesendet werden, als auch weitgehende Störsignalunempfindlichkeit vorliegen (**Bild 1**). Deshalb wurde ein Narrow-Band Bandpassverstärker entwickelt, um die Frequenzen im 1,8 GHz Band zu verarbeiten.

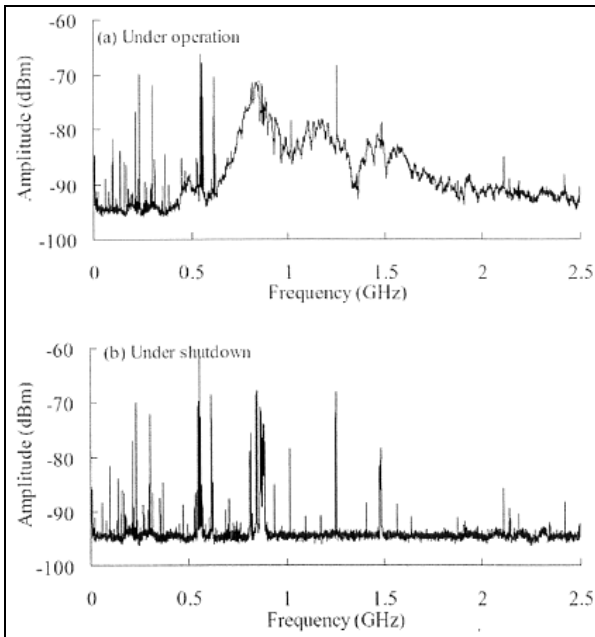


Bild 1 Nutz- und Störsignale an einem Turbogenerator (während Betrieb und bei Abschaltung) bei Messung mit Bandpassantenne; c/o Mitsubishi

Zur Verifikation wurde ein Empfindlichkeitstest mit 2 Spitzenkontakten durchgeführt (**Bild 2**). Ein Vergleich mit einem konventionellen System mit kapazitiver Koppelung zeigte gute Korrelation zwischen der erhaltenen Nutzsignalstärke des Mikrowellensensors (MWS) und der erhaltenen Ladungsmenge des konventionellen Systems.

Der MWS kann auch schwache Wellen, die einigen 10 pC Ladung entsprechen, gut auflösen. Der Dynamikbereich beträgt über 60 dB, damit ist das System in jedem Fall auch für Alterungs- und Trendanalysen des Isolierungszustandes geeignet.

Der Einbau in das Generatorgehäuse erweist sich als relativ unkritisch; auch die Orientierung scheint keinen nennenswerten Einfluss auf die Messsensitivität zu haben /8/, da die Mikrowellen im Gehäuse reflektiert werden und in allen Ebenen etwa gleich stark sind.

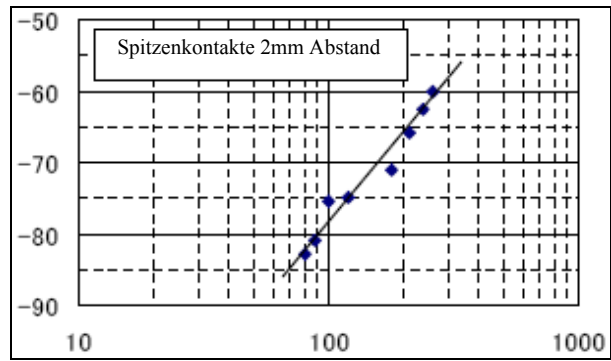


Bild 2 Sensitivity Check an Spitzenkontakten (Spektrale Strahlungsintensität [dBm] mit MWS über Endladungsmenge [pC] mit konventionellem kapazitivem System); c/o Mitsubishi

3.2 Anwendung mit Impulsgenerator

Aufgrund der guten Ergebnisse mit dem kompakten Aufbau, der hohen spektralen Signalstärke und Störfreiheit des Systems wurde die Anwendung bei einer Prüfung mit repetierender Impulsbeanspruchung an Niederspannungswicklungen untersucht. In Zusammenarbeit mit ECG Co. Ltd. wurde die Signalverarbeitungsbaugruppe modifiziert und an den schnellen A/D Konverter eines modernen digitalen programmierbaren Stossspannungsgenerators angepasst. Der Bandpass wurde auf 1.7 GHz modifiziert.

Bild 3 zeigt ein Blockdiagramm des modifizierten MWS.

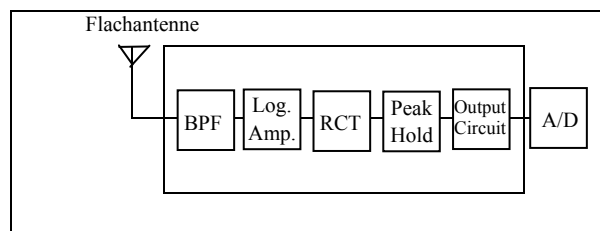


Bild 3 Blockdiagramm des Mikrowellensensors

Idealerweise würde ein in der Amplitude bis etwa 3 kV stufenlos regelbarer Rechteckgenerator (3-phasig) mit Dynamikwerten wie ein schneller Umrichter verwendet, um die realen Verhältnisse auch bzgl. Polaritätswechsel und Taktrate nachzubilden und auch die PDIV und PDEV nach IEC 60034-18-41 bestimmen zu können. Dieser ist jedoch in kompakter Bauweise nicht kommerziell verfügbar und es ist zu befürchten, dass eine längere Beanspruchung mit deutlichen Überspannungen und hoher Taktrate zu einer thermischen oder Isolationsverschädigung der Prüflinge führen könnte.

Der Stoßgenerator liefert lastimpedanzabhängige Anstiegszeiten von 100-350 ns und bewegt sich damit im du/dt Bereich schneller Umrichter. Die Wiederholrate beträgt etwa 20 Hz. Die Triggertaktung zwischen den in dem Impulsgenerator eingebauten MWS und dem A/D Wandler ist synchronisiert. Die Flachantenne ist mit kurzem, HF-geschirmtem Kabel mit dem Gerät verbunden und wird nahe an den Prüfling angeordnet (5-20 cm).

Bilder 4-6 zeigen den Messaufbau und die grafische Ergebnisdarstellung für einen Fall mit TE.



Bild 4 Mikrowellensensor und Bandpassantenne

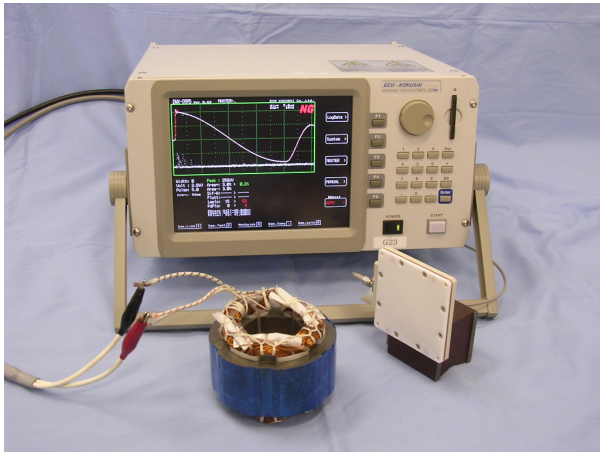


Bild 5 Testaufbau mit Antenne und im Prüfgerät integriertem MWS

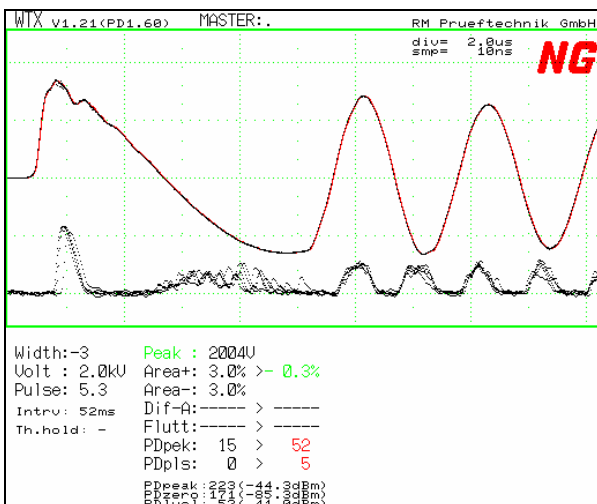


Bild 6 Automatische Prüfung mit auftretender TE

3.3 Automatische Bestimmung der PDIV/PDEV

Ein Prüfalgorithmus wurde entwickelt, um die Prüfspannung automatisch in einstellbare Stufen und mit festgelegter Impulsanzahl pro Inkrement zu erhöhen, bis der TE- Einsatz erreicht ist (bzw. zu reduzieren bis zum TE Aussetzen).

Aus der Signalstärke des MWS-Signals wird nach der Digitalisierung ein numerischer Wert gewonnen, dessen Toleranzgrenze (Schwellwert) frei einstellbar ist, um u. a. das Digitalisierungsrauschen auszublenden. Außerdem werden die Impulse, die den Schwellwert überschreiten, gezählt, so dass eine Prüfung auf **repetierende** TE Einsatz- und Aussetzspannung entsprechend der Angaben in VDE 530-18-41 möglich ist (RPDIV und RPDEV).

Schließlich werden die TE Impulse auch visualisiert (durch Hüllkurvendarstellung im 512p Raster). Dadurch kann die Korrektheit der Prüfung und der Auswerteeinstellungen beurteilt werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Konfiguration mit externer Sensorantenne besteht in der Integrierbarkeit in Produktionsanlagen und komplexe Prüfsysteme mit umfangreicher Verkabelung (HV Prüfmultiplexer), welche die Signalstärke stark dämpfen oder das TE- Signal beeinflussen würden, wenn es nicht direkt an der Quelle erfasst und auf direktem Weg zur Signalverarbeitungsbaugruppe geführt würde.

Je nach gewählten Einstellungen wäre hiermit erstmals eine automatisierte Stückprüfung auf TE Gehalt bei Impulsbeanspruchung einschließlich Ermittlung des PDIV jedes Wicklungsteiles möglich. **Bild 7** zeigt das Ergebnis eines PDIV Tests. **Bild 8** zeigt eine Darstellung des Signalpegels bezogen auf die angelegte Spannung für alle Schritte bei einem PDIV - PDEV Test.

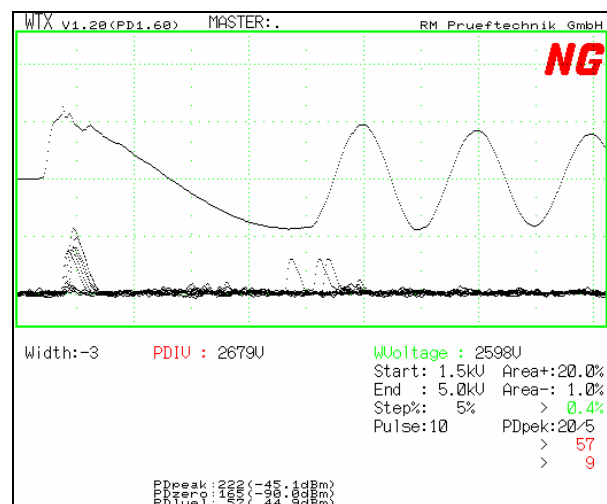


Bild 7 Beispiel für eine PDIV Prüfung mit Einblendung der PDIV, Ladespannung und der relativen Ladungsmenge mit Anzahl der Impulse über dem Schwellwert

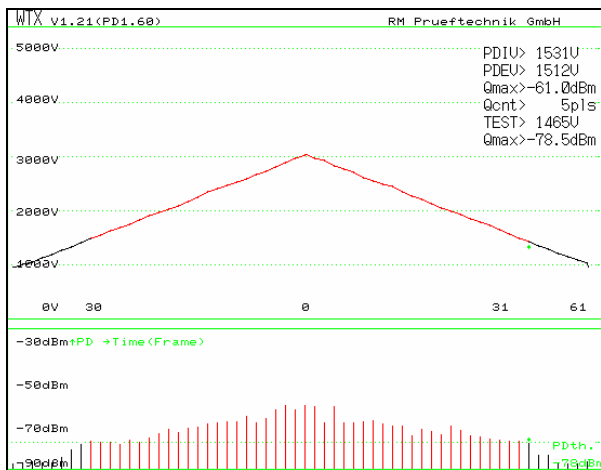


Bild 8 PDIV–PDEV Test Graph mit Schwellwert-Darstellung

4 Praxiserfahrungen

Es wurde eine Vielzahl von Niederspannungsmaschinen im Bereich von 0.5 kW bis 150 kW getestet. Als Referenz diente ein seit 10 Jahren im Markt bekanntes TE- Filtergerät (PD Alert, Fa. IRIS) mit analoger Signalausgabe und kapazitiver Signalauskoppelung (max. 66 dB). An offenen Statorn ist das Ergebnis durchweg positiv. Die TE- Einsetzspannungspegel (PDIV) unterscheiden sich nur um weniger als 100 – 200 V, abhängig von der Lage des Sensors und der Quelle der TE (Phase-Phase, Phase-Masse, Windung- Windung).

Bei geschlossenen Maschinen ist das System mit MWS naturgemäß im Nachteil; je nach Größe der Maschine und Vollständigkeit der elektromagnetischen Schirmung durch die Kapselung ist das gewonnene MW Signal nur noch schwach feststellbar.

Aufgrund der automatischen Sicherung der PDIV/PDEV Werte und des relativen TE- Pegels sind leicht statistische Daten gewinnbar und das System neben Aufgaben in QS/Labor/Produktentwicklung zumindest bei kleineren Antrieben auch für offline Zustandsdiagnose einsetzbar. Ein besonderer Nutzen ergibt sich bei der Bewertung älterer Maschinen und deren Eignung für moderne PWM Steuerungen. Da auch eine 10 und 20 kV Variante des Systems verfügbar ist, kann noch eine Beurteilung des TE Gehaltes an Formspulen von Mittelspannungsmaschinen erfolgen.

5 Zusammenfassung

Ein neues, komfortables Verfahren zur automatischen TE- Prüfung an impulsbelasteten Antrieben und Wicklungen wurde vorgestellt und in der Praxis erprobt. Das Verfahren mit Stoßimpulsgenerator und Schmalband Mikrowellensensor im GHz Bereich erweist sich als praxistgerecht, nahezu störungsfrei und sehr gut reproduzierbar und ist besonders für QS und Entwicklungsanwendungen geeignet. Diese im Markt einmalige Konfiguration unterstützt die Empfehlungen und Qualifizierungstests von VDE 530-18-41 und IEC TS 61934.

Einschränkungen gibt es lediglich bei großen elektrischen Maschinen (Leistungsfähigkeit des Stoßgenerators) sowie bei gut elektromagnetisch abgeschirmten Systemen. Hier wäre ein online/offline System mit kapazitiver Auskoppelung im Vorteil.

Literatur

- /1/ M. Kaufhold: "Wicklungsisolierung umrichter-gespeister rotierender Maschinen – Belastung, Festigkeit, Qualifizierung"; ETG Workshop "Isoliertesysteme bei repetierenden impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen"; 7/09, VDE (ETG) Q2 Hannover
- /2/ G. C. Stone, I. Culbert: "Experience with partial discharge testing during voltage surges as required by IEC 60034-18-41"; Insucon 2009 Proceedings, Birmingham 5/09
- /3/ S. R. Campbell, G. C. Stone: "Examples of Stator Winding Partial discharges due to inverter drives"; ISEI 2000, Anaheim
- /4/ K. Müller: Dissertation "Entwicklung und Anwendung eines Messsystems zur Erfassung von Teilentladungen bei an Frequenzumrichtern betriebenen elektrischen Maschinen"; 9/2003
- /5/ Kaneda, Yoshimura, Muto et al: "Monitoring System of PD for High-Voltage Motors using GHz Electromagnetic Wave Detection"; 2005/3 IEE Japan
- /6/ Asano, Kubosaki, Kaneda, Muto: "Developments and application of a microwave sensor designed for PD detections"; 2008/3 IEE Japan
- /7/ Muto, Kaneda, Aoki, Hamamoto: "Online PD Monitoring System for Rotating Machines, using Narrow Band Detection of EM Wave in GHz range"; 2008 Intl. Conference on CM and Diagnosis, Beijing 3/08
- /8/ IEC TS 60034-18-41: "Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in Rotating Electrical Machines fed from Voltage Converters"; 2006
- /9/ IEC TS 61934: "Electrical measurement of partial discharges (PD) under short risetime and repetitive voltage impulses"; 2006