

Diss. ETH Nr. 15656

Time to breakdown of high voltage winding  
insulations with respect to microscopic  
properties and manufacturing qualities

A dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**  
for the degree of  
**DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES**

presented by

**RUBEN VOGELSANG**

Dipl.-Ing., Dresden University of Technology, Germany

born on the 22<sup>nd</sup> of June, 1972

citizen of Germany

Accepted upon recommendation of  
Prof. Dr. Klaus FRÖHLICH, examiner  
Prof. Dr. Hans Michael MUHR, co-examiner

Zürich, 2004

# Abstract

High voltage rotating machines remain to play a significant role in generating electrical energy as the demand for new or refurbishment of power stations continues to increase. However, one of the main causes for down times in high voltage rotating machines is related to problems with the winding insulation. The deregulated and liberalised energy market leads to cost pressure on the producers of the insulation materials and on the utilities. Manufacturers are requesting winding insulations that can withstand a higher electric field than the 2 – 3 kV/mm common today while keeping the costs low. The utilities want to reduce costs through longer maintenance intervals and a higher lifetime of the machines. These demands create a challenge for the producers of winding insulations, the manufacturers of high voltage rotating machines and the utilities and were therefore a reason to carry out this project.

Although, electrical degradation and breakdown in polymers has been studied extensively, the processes that lead to failure in high voltage winding insulations have still not been conclusively described. In particular, the influences of the numerous combinations of different raw materials, mica tapes, manufacturing qualities and service loads on the material properties and on time to breakdown are not fully understood. Since the material effort for testing insulations with the standard test method (IEEE 1043 Std) is very high, only few results of tests of winding insulations are available, each having a low number of samples and therefore a high statistical uncertainty.

Therefore, the main factors that influence time to breakdown of high voltage winding insulations were analysed in this work. It was concentrated on describing the influences of raw materials, mica tapes, manufacturing qualities and selected service loads on the microscopic properties and on time to breakdown of the insulations.

The analysis of microscopic properties of mica tapes in winding insulations show that the tapes are circularly bent at the edges of the conductor, at voids or within the insulation. In addition, the mica tapes are bent at regions of tape overlappings. Investigations in model needle-plane arrangements show that the electrical tree cannot penetrate a mica tape if it is undistorted. In contrast, the tree can penetrate circularly bent tapes, whereby the

probability for penetrating the tapes decreases with increasing radius. For tape overlappings, the probability of the tree penetrating the tapes decreases with increasing apex angle. Time to breakdown can significantly be reduced when the tree penetrates the tape. The cause for the tree penetrating the bent tape is a higher degree of separation of the mica flakes at stronger bending. Thereby, the tree propagates more easily through the separated flakes, which leads to a shorter breakdown path and to a significantly reduced time to breakdown. Tapes with glass fabric as a support material are more flexible, which resulted in less tree penetrations than tapes with PETP-film. For manufacturers of winding insulations, it can be concluded that tape bends should be minimised (e.g. by applying tapes with a higher width). If bends cannot be avoided, such as at the conductor edge, their radius should be as high as possible. As the tree could penetrate all tapes at radii of  $\leq 1$  mm, the value for tape bends in the insulations must have a minimum of  $> 1$  mm. For winding insulations in which more tape bends are expected (e.g. poor manufacturing qualities), tapes with glass fabric as support material are recommended for application.

Electrical tree propagation is the main process that leads to breakdown in high voltage winding insulations. Due to a significantly enhanced electric field in voids at the inner conductor or at the outer coating, the time interval for tree inception in the bars is negligibly low. After inception, the tree propagates through the insulation along the mica tapes at the interfaces mica-support material-binder resin. Tree propagation is reduced in insulations with a higher number of tape layers and higher mica content. In order to increase time to breakdown (or lifetime) of winding insulations, it is concluded that tree inception should be delayed and tree propagation must be slowed down. Tree inception can be delayed by preventing voids at the conductor (e.g. by using a tape with higher resin content in the first layer) or by applying a conductive layer at the inner conductor. To slow down tree propagation, the mica content and the number of tape layers of the main wall insulation must be as high as possible. Therefore, more layers of thinner mica tapes are recommended for use.

In order to measure the tree propagation through the material, a test was developed that requires much less material than the conventional test according to IEEE 1043 Std. Using that treeing test with an embedded electrode, significant differences in the insulation properties can be identified. A further advantage is that the electrode can be implanted in a determined region of the insulation, which allows testing insulation properties at certain sections of the bar. As the test can also be applied at bars that were already produced, it is very easily applicable and can be recommended for tests where only a low number of samples are accessible, which might be due to time, cost or material reasons.

At manufacturing, impregnation and the type of taping play an important role towards the insulation quality. A lower impregnation quality causes voids and delaminations in the material, which results in significantly reduced time to breakdown values. The degree of reduction depends on the material, whereby mica tapes with glass fabric are less sensitive for impregnation failure, than tapes with PETP-film as a support material. The influence of taping on time to breakdown was investigated on industrially-manufactured insulations directly from the production line of different companies. Insulations that were taped by machine have a structure without any voids or delaminations and therefore no significant differences in the time to breakdown values, compared to the reference material. In contrast, insulations that were taped by hand tend to have a lower insulation quality, which may lead to a dramatic decrease in time to breakdown compared to the reference material. The 63%-quantile of time to breakdown of a hand-taped VPI-insulation was reduced by more than two orders of magnitude and that of a resin rich insulation by more than four orders of magnitude! Both insulation systems showed an internal quality with many voids and delaminations between the mica tapes. Electrical trees could therefore propagate very

quickly along the tapes, thus leading to the early breakdown. Considering the materials, resin rich insulations are more sensitive to manufacturing failures than VPI-insulations as their time to breakdown values were vastly reduced at both, poor impregnation and poor taping quality. In conclusion, machine taping is strongly recommended for the wrapping of mica tapes. If hand taping shall be used, VPI-tapes with glass fabric as support material are less sensitive for poor taping quality and should therefore be applied. In order to ensure good quality during production, electrical treeing tests with the embedded electrode are recommended for checking the insulation quality in the production line at regular intervals.

Although time to breakdown values of insulations with poor quality is significantly lower than the values for the reference material, most of the bars would have passed the standard "One minute proof test" according to IEC 60243-1 Std and IEC 1212.2 Std. At three times the rated voltage, breakdown in poor insulations occurred within a few minutes, whereas in good insulations it occurred in some tens of hours up to about 5,000 hours. It is therefore recommended to extend the time interval of the "One minute proof test" to > 10 min. Insulations with a poor quality would thereby be tested out and insulations with a good quality would experience no significant degradation.

At elevated temperatures, the VPI-insulation showed, compared to 20 °C, an increase in time to breakdown at 160 °C and a decrease at 180 °C. In contrast, the resin rich insulation showed, compared to 20 °C, a decrease of time to breakdown at both, 160 and 180 °C. The different breakdown behaviour of the materials can be related to the relief of mechanical strain of the bars, the different materials of the mica tapes and the expansion of the material. At temperatures of 180 °C, PETP-film as support material is critical since it degrades and leads to faster tree propagation, which finally causes a significant decrease of time to breakdown. For the operation of the insulations it is concluded that elevated temperatures are only critical if they are close or above the glass transition temperature of the material. Operating at that temperature level, or hot spots in the insulation, should therefore be avoided or minimised. Since there is an increase of time to breakdown, the operation at slightly elevated temperatures should be considered.

At mechanical vibrations between  $\pm 0.15$  and  $\pm 0.80$  mm, time to breakdown is mainly dependent on the vibration frequency and the material used rather than on the total number of vibrations. For both materials, the highest reduction of time to breakdown was measured at the highest vibration frequency of the bars of 50 Hz. The reason for the decrease is that the epoxy resin in the insulation becomes porous, which gives way to fast tree propagation and finally results in significantly reduced time to breakdown values. For both, VPI and resin rich insulations, it can be concluded that mechanical vibrations are very critical and must therefore be absolutely avoided in the machines.

Overall, it can be concluded that the manufacturing quality of high voltage winding insulations plays a major role towards microscopic properties and therefore time to breakdown of winding insulations. In order to extend lifetime, more attention has to be paid to the manufacturing of the insulations. Regarding the application of the two main insulation systems VPI and resin rich, it can be stated that the microscopic properties of resin rich insulations have the higher potential for longer lifetime expectancy. However, these materials are more sensitive to any kind of failure during manufacturing and service load. In contrast, VPI-materials have generally a lower potential for long lifetime expectancy, but are more tolerant to manufacturing failures and therefore more easily applicable.

# Kurzfassung

Aufgrund der weltweit steigenden Nachfrage nach neuen oder instand zu setzenden Kraftwerken, bleiben rotierende Hochspannungsmaschinen ein wichtiges Element in der elektrischen Energieversorgung. Etwa ein Viertel aller Ausfallzeiten von Kraftwerken sind jedoch auf Probleme in Wicklungsisolierungen zurückzuführen. Im deregulierten und liberalisierten Energiemarkt spielen Kosten sowohl für Hersteller von Hochspannungsmaschinen als auch für Energieversorger eine immer bedeutendere Rolle. Die Hersteller der Maschinen verlangen nach kostengünstigen Wicklungsisolierungen, die bei höheren Feldstärken als den heute üblichen 2 – 3 kV/mm arbeiten. Die Energieversorger möchten ihre Kosten durch geringere Wartungsintervalle und eine höhere Lebensdauer der Maschinen reduzieren. Diese Forderungen bilden eine Herausforderung für die Hersteller von Wicklungsisolierungen, von Hochspannungsmaschinen aber auch für die Energieversorgungsunternehmen und haben zur Initiierung des vorliegenden Projektes geführt.

Obwohl zum elektrischen Durchschlag in polymeren Isolierstoffen bereits viele Forschungen durchgeführt wurden, sind die Prozesse, welche zum Ausfall von Wicklungen in rotierenden Hochspannungsmaschinen führen, noch nicht vollständig aufgezeigt. Insbesondere sind die Einflüsse der zahlreichen Kombinationen aus Rohmaterialien, Glimmerbändern, Herstellungsverfahren und -qualitäten sowie der Belastungen im Betrieb auf die Materialeigenschaften und damit auf die Durchschlagzeiten nicht vollumfänglich bekannt. Prüfungen nach der Standardmethode IEEE 1043 Std bedingen einen sehr hohen Materialaufwand. Daher existieren nur wenige Resultate von Lebensdauerversuchen an Wicklungsisolierungen, welche aufgrund der geringen Probenanzahl eine hohe statistische Unsicherheit aufweisen.

Aus den genannten Gründen wurden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Durchschlagzeit von Wicklungsisolierungen rotierender Hochspannungsmaschinen untersucht und in der vorliegenden Arbeit beschrieben. Dabei wurde der Schwerpunkt darauf gelegt, die Einflüsse der verschiedenen Rohmaterialien, Glimmerbänder, Herstellungsverfahren und -qualitäten sowie ausgewählter Betriebsparameter auf die Materialstruktur und damit auf die Durchschlagzeit der Isolierungen zu bestimmen.

Die Analyse der Glimmerbänder in Wicklungsstäben zeigt, dass die Bänder an den Kanten des Innenleiters, an Gaseinschlüssen, an Bandüberlappungen sowie in der Isolierung selbst gebogen sind. Untersuchungen an Nadel-Platte-Anordnungen haben bewiesen, dass das elektrische Bäumchenwachstum (Electrical Treeing) intakte Glimmerbänder nicht durchdringen kann. Im Gegensatz dazu kann ein elektrisches Bäumchen (Electrical Tree) gebogene Glimmerbänder durchdringen. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Tree das Band durchdringt, steigt mit kleiner werdendem Biegeradius. An Bandüberlappungen ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Tree das Band durchdringt, bei grösserem Öffnungswinkel des Bandes geringer. Die Ursache für das Durchdringen des Bandes ist die Aufspaltung der Glimmerplättchen bei starker Biegung, wobei sich der Tree durch das Epoxidharz zwischen den aufgespaltenen Glimmerplättchen leicht ausbreiten kann. Dies führt zu einem geringeren Durchschlagweg und kann damit eine signifikant geringere Durchschlagzeit bewirken. Glimmerbänder mit Glasgewebe als Trägermaterial haben sich als flexibler erwiesen. Sie werden nicht so häufig vom Tree durchdrungen wie Bänder mit PETP-Film. Für Hersteller von Wicklungsisolierungen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass das Auftreten von gebogenen Glimmerbändern in der Isolierung minimiert werden muss (z. B. durch die Verwendung von breiteren Glimmerbändern, was zu einer geringeren Anzahl von Bandüberlappungen führt). Für Bereiche, an denen Bandbiegungen nicht vermieden werden können, wie z. Bsp. an den Kantenradien, sollte der Biegeradius so gross als möglich sein. Da der Tree gebogene Bänder aller Materialien mit einem Radius  $\leq 1$  mm durchdringen konnte, sollten Bandbiegungen mindestens  $> 1$  mm sein. Für Wicklungsisolierungen, in welchen viele Bandbiegungen zu erwarten sind (z. B. bei fehlerhafter Wickelqualität), werden Bänder mit Glasgewebe als Trägermaterial empfohlen, da sie weniger empfindlich gegenüber dem Durchdringen eines Trees sind.

Der Hauptprozess, welcher in Wicklungsisolierungen rotierender Hochspannungsmaschinen zum Durchschlag führt, ist die Ausbreitung des Electrical Treeings. Ein stark überhöhtes elektrisches Feld in Gaseinschlüssen am Innen- und Aussenleiter führt zu einer vernachlässigbar geringen Zeit für den Einsatz eines Trees. Nach dem Einsatz breitet sich der Tree entlang der Glimmerbänder an den Grenzschichten Glimmer-Trägermaterial-Bindeharz aus, wobei dessen Ausbreitung in Isolierungen mit einem hohen Glimmeranteil sowie mit vielen Bandlagen langsamer verläuft. Daraus kann geschlossen werden, dass für eine Erhöhung der Durchschlagzeit (Lebensdauer) von Wicklungsisolierungen der Einsatz und das Durchwachsen des Trees verlangsamt werden muss. Der Treeeinsatz kann durch das Füllen der Hohlräume am Innenleiter (z. B. die Anwendung eines Bandes mit höherem Harzanteil in der ersten Lage am Innenleiter) oder durch die Abschirmung der Hohlräume (leitfähige Schicht am Innenleiter) verzögert werden. Um das Vorwachsen des Trees zu verlangsamen, sollten der Glimmergehalt und die Anzahl der Bandlagen so hoch als möglich sein. Dazu wird empfohlen, viele Bandlagen mit dünneren Glimmerbändern zu verwenden.

Um die Ausbreitung des Electrical Treeings im Material zu bestimmen, wurde ein Prüfverfahren entwickelt, welches bei gleicher statistischer Aussagekraft wesentlich weniger Material benötigt als der herkömmliche Test nach IEEE 1043 Std. Mit dem Test mit einer in das Isoliermaterial eingebrachten Elektrode können signifikante Unterschiede in den Isoliereigenschaften bestimmt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Elektrode gezielt in die Isolierung eingebracht werden kann, was die Untersuchung ausgewählter Bereiche in Wicklungsisolierungen ermöglicht. Da der Test an bereits gefertigten Stäben angewendet werden kann, ist er in der Praxis sehr leicht umsetzbar und wird daher für Untersuchungen empfohlen, bei denen aus Zeit- oder Kostengründen nur wenige Proben zur Verfügung stehen.

Bei der Herstellung bestimmen die Imprägnierung sowie die Art der Bandwicklung die Qualität der Wicklungsisolierungen entscheidend. Eine ungenügende Imprägnierung verursacht Gaseinschlüsse und Delaminierungen des Bandes im Material, welche zu einer signifikant geringeren Durchschlagzeit führen. Der Grad der Reduzierung der Durchschlagzeit hängt vom verwendeten Material ab, wobei Glimmerbänder mit Glasgewebe weniger empfindlich sind als Glimmerbänder mit PETP-Film als Trägermaterial. Der Einfluss der Bandwicklung auf die Durchschlagzeit wurde an industriell gefertigten Stäben untersucht, welche direkt aus der Fertigung verschiedener Hersteller bezogen wurden. Maschinengewickelte Isolierungen haben Materialstrukturen ohne Gaseinschlüsse oder Delaminierungen und daher keine signifikant geringeren Durchschlagzeiten als das Referenzmaterial. Im Gegensatz dazu können handgewickelte Isolierungen wesentlich geringere Durchschlagzeiten aufweisen. Das 63%-Quantil der Durchschlagzeit einer VPI-Isolierung ist im Vergleich zum Referenzmaterial um mehr als zwei Größenordnungen, das einer Resin Rich Isolierung um mehr als vier Größenordnungen reduziert! Beide Isoliersysteme hatten eine sehr fehlerhafte Materialqualität mit vielen Gaseinschlüssen und Delaminierungen. In diesen Fehlstellen kann sich ein Tree sehr schnell ausbreiten, was die ausserordentlich geringen Durchschlagzeiten erklärt. Betrachtet man die Isoliertypen, sind Resin Rich Isolierungen störanfälliger für Herstellungsfehler als VPI-Isolierungen, da sich die Durchschlagzeiten dieser sowohl bei fehlerhafter Imprägnierung als auch bei fehlerhafter Wickelqualität signifikant reduzierten. Als Schlussfolgerung ist zu sagen, dass eine Maschinenwicklung für die Herstellung der Isolierung strengstens empfohlen wird. Wird trotzdem eine manuelle Wicklung bevorzugt, so sollten VPI-Glimmerbänder mit Glasgewebe eingesetzt werden, da diese weniger empfindlich auf Herstellungsfehler reagieren. Generell sollten für Herstellverfahren mit geringeren Qualitätsstandards Glimmerbänder mit Glasgewebe als Trägermaterial verwendet werden. Um eine gleich bleibend hohe Qualität im Herstellprozess zu garantieren, wird empfohlen, die Durchschlagzeit der Isolierungen regelmässig mit der Methode der eingebetteten Elektrode zu kontrollieren.

Obwohl die Durchschlagzeiten der Isolierungen mit geringer Qualität signifikant unter denen des Referenzmaterials lagen, hätten die meisten Stäbe den „1-Minuten-Test“ nach IEC 60243-1 Std und IEC 1212.2 Std bestanden. Bei einem Wert des dreifachen der Bemessungsspannung findet der Durchschlag in fehlerhaften Isolierungen innerhalb weniger Minuten statt. Die Durchschlagzeit hochwertiger Isolierungen liegt jedoch bei Werten von einigen zehn bis fast 5.000 Stunden. Es wird daher empfohlen, das Zeitintervall für den „1-Minuten-Test“ auf  $> 10$  min zu verlängern. Dadurch ist es möglich, fehlerhafte Isolierungen herauszuprüfen und dabei hochwertigen Isolierungen keine signifikante Schädigung zuzufügen.

Bei erhöhten Temperaturen zeigt eine VPI-Isolierung im Vergleich zu 20 °C eine erhöhte Durchschlagzeit bei 160 °C und eine reduzierte Durchschlagzeit bei 180 °C. Im Gegensatz dazu zeigt die Resin Rich Isolierung gegenüber 20 °C sowohl bei 160 °C als auch bei 180 °C eine reduzierte Durchschlagzeit. Das unterschiedliche Verhalten der Isolierungen kann auf abnehmende mechanische Spannungen im Stab, Unterschiede im Glimmerband und die Ausdehnung der Isolierung zurückgeführt werden. Bei Temperaturen von 180 °C ist PETP-Film als Trägermaterial ungeeignet, da es schmilzt und damit die Ausbreitung des Trees beschleunigt, was wiederum zu einer signifikant geringeren Durchschlagzeit führt. Für Betriebsbelastung kann geschlussfolgert werden, dass erhöhte Temperaturen nur kritisch sind, wenn sie oberhalb der Glasübergangstemperatur liegen. Betriebstemperaturen in diesem Bereich oder heisse Punkte in der Isolierung sollten daher unbedingt vermieden oder zumindest minimiert werden. Da es Temperaturbereiche gibt, bei denen

die Durchschlagzeit signifikant länger ist, kann der Betrieb bei leicht erhöhten Temperaturen empfohlen werden.

Für mechanische Vibrationen zwischen  $\pm 0.15$  und  $\pm 0.80$  mm ist die Durchschlagzeit von der Vibrationsfrequenz und vom Materialtyp abhängig und nicht von der tatsächlichen Anzahl der Vibrationen. Für ein VPI und ein Resin Rich Isoliersystem wurde die grösste Reduzierung der Durchschlagzeit bei der höchsten Vibrationsfrequenz der Stäbe von 50 Hz gemessen. Der Grund für die geringe Durchschlagzeit liegt darin, dass das Epoxidharz im Material bei hoher Vibrationsfrequenz porös wird. Poröse Bereiche ermöglichen ein schnelleres Vorwachsen des Trees, was wiederum zu einer signifikant reduzierten Durchschlagzeit führt. Für beide Isoliersysteme wird geschlussfolgert, dass mechanische Vibrationen das Material stark beeinträchtigen und daher unbedingt zu vermeiden sind.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Herstellungsqualität die mikroskopische Struktur und damit die Durchschlagzeiten von Wicklungsisolierungen signifikant bestimmt. Die zu erwartende Lebensdauer der Isolierungen wird bereits stark beeinflusst, bevor die Maschine in Betrieb genommen wird. Um die Lebensdauer zu verlängern, sollte die Herstellungsqualität der Isolierungen verbessert werden. Bezüglich der beiden Isoliersysteme VPI und Resin Rich ist zu sagen, dass Resin Rich Materialien eine höhere potenzielle Lebensdauer haben, jedoch empfindlicher auf herstellungsbedingte Fehler oder Belastungen im Betrieb reagieren. VPI-Isolierungen besitzen zwar keine so hohe potenzielle Lebensdauer, sind jedoch fehlertoleranter und daher einfacher anzuwenden.