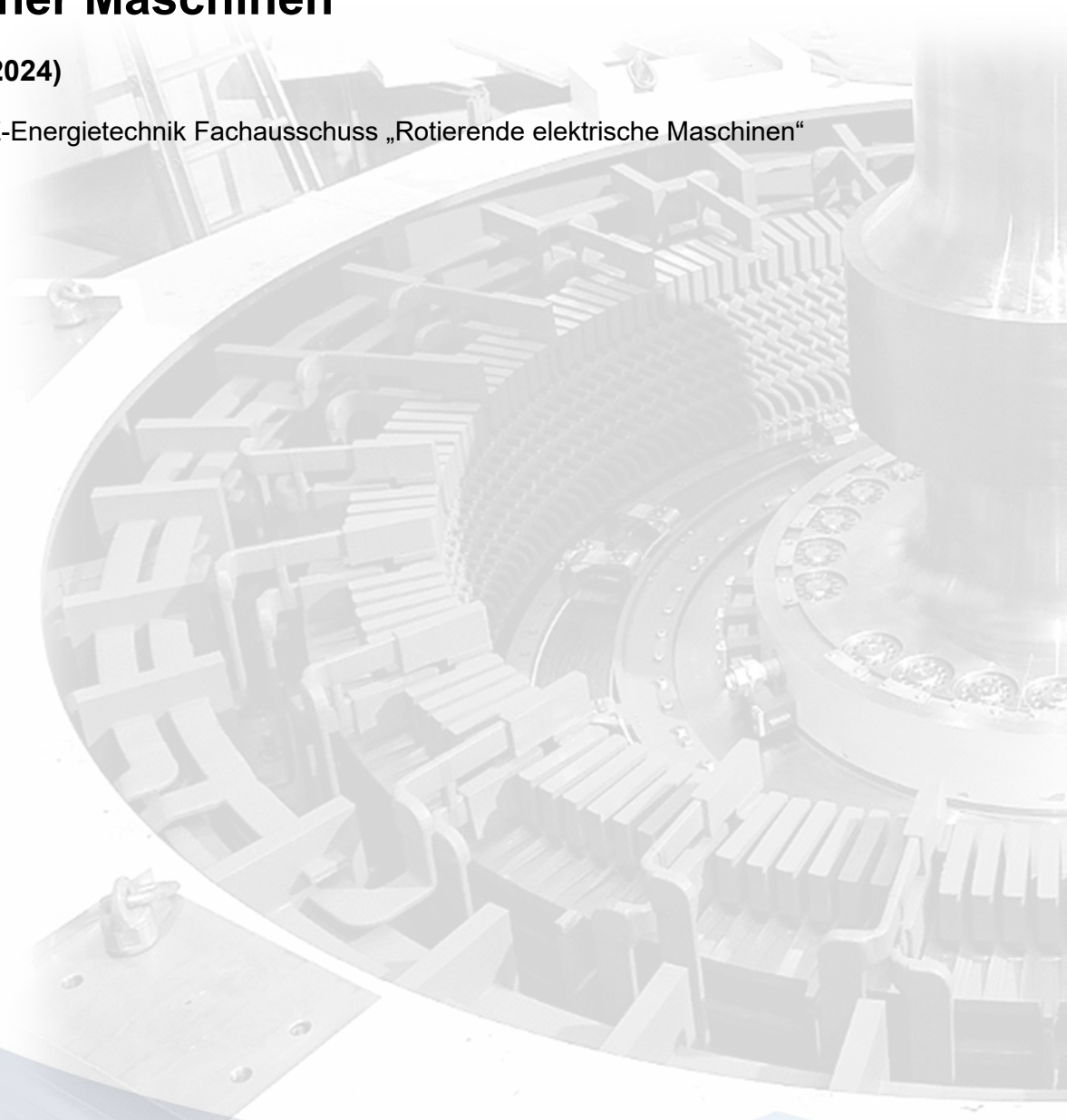


Leitfaden für die Hochspannungsprüfung von Ständer- und Läuferwicklungen rotierender elektrischer Maschinen

Ausgabe 1.1 (2024)

Erstellt vom OVE-Energiertechnik Fachausschuss „Rotierende elektrische Maschinen“



Vorwort

Dem OVE-Energietechnik Fachausschuss „Rotierende elektrische Maschinen“ (FA REM) obliegt unter anderem die Aufgabe, Beiträge zur fachlichen Weiterbildung der Mitglieder zu leisten. Vorliegendes Dokument ist eine Überarbeitung des Kapitels „Bedingt zerstörungsfreie Hochspannungsprüfverfahren“ des 1990 herausgegeben OVE-Merkblattes 2 „Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen“. Es erfolgt eine Neubewertung der Eignung für Zustandsbeurteilungen durch in der Anwendung gewonnene Erfahrungen aus der Sicht der Anwender. Zielgruppe sind Betriebsingenieure und Techniker, die mit der Wartung und Instandsetzung von elektrischen Maschinen betraut sind.

Um weitere nationale und internationale Fachkollegen, welche nicht Mitglied im FA REM sind, anzusprechen, erfolgt die Veröffentlichung über die Homepage der OVE-Energietechnik.

Wien im November 2024

Im Namen der Mitglieder des FA REM
Karl Zikulnig (Vorsitzender)

Verfasser: Erich Binder

Redaktionelle Leitung: Martin Althoff

Revisionsteam: Martin Althoff, Thomas Hildinger, Werner Ladstätter, Fabian Öttl, Alexander Schwery, Karl Zikulnig

Änderungsverzeichnis:

Version	Datum	Verfasser		Kapitel	Änderung, Ergänzung
1.1	11 / 2024	Erich Binder		Alle	Basisversion

Copyright:

Die Urheberrechte an dieser Publikation liegen bei der OVE-Energietechnik im Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE)

A-1010 Wien ■ Eschenbachgasse 9

Tel. +43 1 587 63 73 - 0 ■ E-Mail: oge@ove.at ■ www.ove.at

Inhalt

1	Zweck, Übersicht	4
2	Prüfverfahren	4
2.1	Stehspannungsprüfung mit Wechselspannung	5
2.2	Stehspannungsprüfung mit Gleichspannung.....	5
2.3	VLF (Very Low Frequency)-Stehspannungsprüfung mit 0,1 Hz-Sinusspannung.....	7
3	Anforderungen an das Prüfequipment	7
3.1	Wechselspannungsprüfungen	7
3.2	Gleichspannungsprüfungen	8
3.3	VLF-Spannungsprüfung.....	8
4	Einschränkungen, Anwendungsgrenzen	9
5	Auswertung, Beurteilung.....	9
6	Erfahrung.....	10
	Literaturverzeichnis	10

1 Zweck, Übersicht

Der Nachweis ausreichender Spannungsfestigkeit gegenüber den im Betrieb auftretenden elektrischen Beanspruchungen wird für Hochspannungswicklungen großer rotierender elektrischer Maschinen durch Stehspannungsprüfungen während der Fertigung und bei der Abnahme erbracht. Die elektrische Festigkeit nimmt jedoch im Laufe der Betriebszeit durch die kombinierte Beanspruchung aus elektrischen, mechanischen, thermischen und umweltbedingten Einflussfaktoren ab. Lokale Schwachstellen mit besonders stark vermindertem Isolationsvermögen treten erfahrungsgemäß nur an einzelnen Stäben oder Spulen auf. Liegt deren Isolationsfestigkeit nur noch geringfügig über der Bemessungsspannung der Wicklung, so werden sie bei der Spannungsprüfung gezielt zum Durchschlagen gebracht und durch neue oder neuwertige Spulen bzw. Stäbe ersetzt. Insgesamt wird die Spannungsfestigkeit der Wicklung durch die Beseitigung von Schwachstellen erhöht, da die intakte Wicklungsisolierung durch eine kurzzeitig erhöhte Spannungsbeanspruchung nicht geschädigt wird [1]. Die langjährigen positiven Erfahrungen mit der bedingt zerstörungsfreien Spannungsprüfung, wonach ungeplante Betriebsunterbrechungen mit hohen Energieausfallkosten aufgrund von Isolationsfehlern weitgehend vermieden werden können, bestätigen diese Vorgehensweise.

Die Isoliersysteme von Mittel- und Hochspannungsmaschinen, die von Frequenzumrichtern gespeist werden, sind durch steilflankige Spannungspulse erhöhten thermischen und elektrischen Beanspruchungen ausgesetzt. Die Kriterien für die Qualifizierung des Isoliersystems von Ständer- und Läuferwicklungen, die wiederholten Impulsspannungen ausgesetzt sind, sind in EN 60034-18-42:2017 [2] festgelegt. Mangels ausreichender Langzeiterfahrung der Mitglieder des Fachausschusses sowie laufender Diskussionen in den zuständigen Normungsgremien werden in diesem Merkblatt keine Empfehlungen für die Spannungsprüfung zur Zustandserfassung an solchen Wicklungen gegeben.

2 Prüfverfahren

Grundsätzlich sind Stehspannungsprüfungen sowohl an neu hergestellten als auch an gebrauchten Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen nach IEC 60034-33 [3] und weiteren, nachfolgend aufgeführten Richtlinien durchzuführen. Die umfangreichen Festlegungen in diesen Normen werden hier nur auszugsweise wiedergegeben:

Bei Mehrphasenmaschinen mit einer Bemessungsspannung über 1 kV, bei denen beide Enden jedes Wicklungsstrangs einzeln zugänglich sind, ist die Spannung zwischen jedem Wicklungsstrang und dem Gehäuse anzulegen. Das Blechpaket und die nicht zur Prüfung vorgesehenen Wicklungsstränge sowie die Nut- und Eisenthermometer sind mit der Gehäusemasse zu verbinden. Die Prüfspannung sollte netzfrequent und möglichst sinusförmig sein. Bei neu hergestellten Wicklungen muss der Endwert der Prüfspannung den Angaben in 8.2.6 der IEC 60034-33 [3] entsprechen. Bei Maschinen mit einer Nennspannung unter 6 kV muss der Endwert der Spannung entsprechend der IEC 60034-1 betragen: 1000 V + doppelte Bemessungsspannung, mindestens jedoch 1500 V. Bei Maschinen mit einer Bemessungsspannung von 6 kV oder mehr kann jedoch, wenn keine netzfrequente Prüfeinrichtung zur Verfügung steht, eine Gleichspannungsprüfung durchgeführt werden, die nach 8.2.8 der IEC 60034-33 dem 1,7-fachen des angegebenen Effektivwerts entspricht. Die VLF-Prüfung mit 0,1 Hz Sinusspannung ist in [4] nicht als Alternative aufgeführt, wird aber im IEEE Std 433-2022 [5] ausführlich beschrieben. Als Scheitelwert der VLF-Prüfspannung wird das 1,63-fache des Effektivwertes ($1,15 \times \sqrt{2}$) gemäß 8.2.6 der IEC 60034-33 [3] vorgeschlagen.

2.1 Stehspannungsprüfung mit Wechselspannung

Die Prüfung ist mit einer Spannung von höchstens der Hälfte der vollen Prüfspannung zu beginnen. Die Spannung ist dann gleichmäßig mit ca. 1 bis 2 kV/s oder in Schritten von höchstens 5 % des vollen Wertes auf den Endwert zu erhöhen, wobei die Zeit für den Anstieg der Spannung vom halben auf den vollen Wert nicht weniger als 10 s betragen darf. Die volle Prüfspannung ist dann 1 Minute lang aufrechtzuerhalten. Während dieser Zeit darf kein Durchschlag auftreten (siehe [6]).

Bei der Abnahme von neuen und komplett erneuerten Maschinenwicklungen soll die Stehspannungsprüfung nur einmal mit voller Prüfspannung durchgeführt werden. Wenn zwischen Betreiber und Instandsetzungsunternehmen die Durchführung von Stehspannungsprüfungen an Wicklungen vereinbart wurde, wird in [4] folgende Vorgehensweise empfohlen:

- a) Teilweise erneuerte Wicklungen sind mit 75 % der Prüfspannung einer neuen Maschine zu prüfen. Vor der Prüfung muss der alte Teil der Wicklung sorgfältig gereinigt und getrocknet werden.
- b) Instandgesetzte Maschinen sind nach dem Reinigen und Trocknen einer Prüfung mit einer Spannung zu unterziehen, die dem 1,5-fachen der Nennspannung entspricht, jedoch nicht weniger als 1.000 V, wenn die Nennspannung 100 V oder mehr beträgt, und nicht weniger als 500 V, wenn die Nennspannung weniger als 100 V beträgt.

Diese Empfehlungen gelten grundsätzlich auch für die Prüfung gebrauchter Wicklungen im Rahmen von Revisionen. Dabei können, falls vom Betreiber gewünscht, auch geringfügig reduzierte Prüfschärfen vereinbart werden.

2.2 Stehspannungsprüfung mit Gleichspannung

Netzfrequente Wechselspannungs-Prüfeinrichtungen für Ständerwicklungen müssen für hohe Blindleistungen ausgelegt sein und haben ein hohes Transportgewicht. Deshalb werden stattdessen auch Spannungsprüfungen mit Gleichspannung durchgeführt, für die leicht transportable Prüfeinrichtungen zur Verfügung stehen.

Bei Gleichspannungsprüfungen wird die Potentialverteilung durch die Widerstandsverhältnisse in der geschichteten Hauptisolierung und entlang der Oberflächen bestimmt. Sie unterscheidet sich daher von der kapazitiven bzw. ohmsch-kapazitiven Feldverteilung bei Wechselspannung. Aufgrund der unterschiedlichen Durchschlagsmechanismen ist die Durchschlagsspannung der Nutisolierung von Stäben oder Spulen bei Gleichspannung im Allgemeinen höher als bei Wechselspannung. So ergaben Untersuchungen an einigen gebrauchten Ständerwicklungen für das Verhältnis der Durchschlagsspannungen der Nuthülsen bei Gleich- und Wechselspannung (Effektivwert) beispielsweise Werte zwischen 1 und 3 [7]. Dagegen wird die Wickelkopfisolierung bei Gleichspannung höher beansprucht als bei Wechselspannung, da der Endenglimmschutz nach einem Ladevorgang fast über seine gesamte Länge Massepotential annimmt. Um eine Überbeanspruchung der Wickelkopfisolierung zu vermeiden, wurde daher für die Prüfung kompletter Wicklungen im IEEE Std 95 [7] bzw. in IEC 60034-33 [3] ein Äquivalenzfaktor von 1,7 für das Verhältnis der Gleichspannung zum Effektivwert der Wechselprüfspannung festgelegt. Die Prüfdauer beträgt eine Minute, beginnend mit dem Erreichen der Prüfspannung. In der OVE EN 60034-27-4:2019 [4] sind diese Details nicht explizit enthalten, jedoch wird im Anhang E.4 „DC-Hochspannungsprüfungen“ hinsichtlich der Details der Prüfung auf die o.g. IEEE-Norm verwiesen.

Im Allgemeinen werden Gleichspannungsprüfungen mit negativer Polarität durchgeführt. Das Phänomen der Elektroendosmose¹ bewirkt, dass Feuchtigkeit vom negativ geladenen Leiter angezogen wird. Dies hat zur Folge, dass der Leckstrom in den Kapillaren der Isolierung ansteigt und Fehler in der Isolierung leichter erkannt werden können.

In [7] werden neben der konventionellen DC-Hochspannungsprüfung vor allem Prüfungen mit stufen- oder rampenförmig erhöhter Gleichspannung ausführlich beschrieben. Wird die Spannung rampenförmig, z.B. mit 1 kV/min erhöht, bleibt der kapazitive Ladestrom konstant und relativ klein (16,7 μA bei $C=1 \mu\text{F}$). Der Anteil des Absorptionsstromes steigt annähernd linear proportional zur Spannung an. Diese Proportionalität gilt auch für die Leitungs- und Oberflächenkriechströme, die kontinuierlich durch die Hauptisolierung bzw. über die Oberflächen der Wickelköpfe fließen. Diese Ströme sind bei neuen kunstharzgebundenen Wicklungen, bei denen die Nachvernetzung abgeschlossen ist, kleiner als die beiden anderen Stromkomponenten.

Bei Gleichspannungsprüfgeräten mit einstellbarer Rampenfunktion wird der Isolationsstrom über der angelegten Prüfspannung aufgezeichnet, so dass eine kontinuierliche Beobachtung und Analyse des Stromverlaufes möglich ist. Abweichungen vom linearen Verlauf geben Hinweise auf Schwachstellen, Durchschläge, verschmutzte Wickelköpfe oder Feuchtigkeit in oder auf der Isolierung, wie einige Beispiele in [5] zeigen.

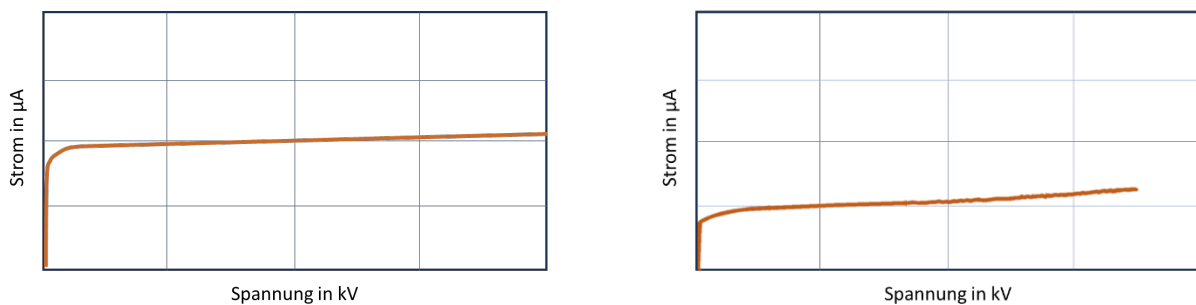


Abbildung 2-1: Beispiele für Stromverläufe bei Spannungsprüfungen mit Rampenspannungen: Links: Typischer Verlauf einer Epoxidharz-Glimmer Isolierung, bei welcher der Nachladestrom relativ gering ist; Rechts: Epoxidharz-Glimmer Isolierung mit Verschmutzungen im Wickelkopfbereich

Im Gegensatz zur Prüfung mit Wechselspannung wird in [7] empfohlen, die zu prüfende Wicklung möglichst an beiden Wicklungsenden anzuschließen. Die nicht geprüften Wicklungsstränge sind beidseitig zu erden. Weitere Angaben zum Prüfaufbau sind der genannten Norm zu entnehmen. Nach der Gleichspannungsprüfung ist die Wicklung über einen Vorwiderstand für eine ausreichend lange Zeit zu entladen. Es wird eine Entladezeit von mindestens 2 Stunden oder der 4-fachen Dauer der Gleichspannungsprüfzeit empfohlen.

¹ Elektroendosmose: Die Wanderung von Feuchtigkeit innerhalb eines stationären Feststoffs unter dem Einfluss eines angelegten elektrischen Feldes in Richtung einer Elektrode. Die Nettobewegung der Wassermoleküle erfolgt im Allgemeinen in Richtung der negativ geladenen Elektrode [7].

2.3 VLF (Very Low Frequency)-Stehspannungsprüfung mit 0,1 Hz-Sinusspannung

Dieses in IEEE 433 [5] beschriebene Prüfverfahren wurde bisher in Österreich noch nicht angewendet und wurde auch in einer nordamerikanischen Umfrage im Jahr 2007 nur von einem geringen Prozentsatz der Betreiber als Standardmethode angegeben [8]. Der Vorteil gegenüber der netzfrequenten Spannungsprüfung ist das wesentlich geringere Gewicht der Prüfeinrichtung. Die elektrische Feldverteilung im Isoliersystem ist besser an die netzfrequenten Betriebsbedingungen angepasst als bei Gleichspannungsprüfungen. Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass die Anzahl der Teilentladungsimpulse je Prüfspannungsperiode bei VLF-Spannungen deutlich geringer ist als bei netzfrequenten Spannungen. Die VLF-Prüfungen ergaben daher höhere mittlere Durchschlagspannungen als die Prüfungen mit netzfrequenter Spannung. Aus diesem Grund wird in der Norm IEEE 433 [5] eine um den Faktor 1,15 höhere Prüfspannung als bei netzfrequenten Spannungsprüfungen empfohlen.

Eine VLF-Prüfung kann mit zusätzlichem Messequipment auch mit Verlustfaktor- und Teilentladungsmessungen kombiniert werden. Untersuchungen [9] haben jedoch gezeigt, dass Beschädigungen des Endenglimmschutzes oder lokale Erosionen des Außenglimmschutzes bei Teilentladungsmessungen nicht oder nur schwer erkennbar sind. Bei Betriebsfrequenz wird die Potentialverteilung an derart geschädigten Oberflächen durch die Kapazitäten der Luftspalte und der Isolierung bestimmt, bei VLF-Beanspruchungen hingegen durch die Oberflächenleitfähigkeit. Dies hat zur Folge, dass die Teilentladungs-Zündspannung bei VLF-Beanspruchungen höher ist.

3 Anforderungen an das Prüfequipment

3.1 Wechselspannungsprüfungen

Aufgrund der großen Kapazitäten der Ständerwicklungen von Wasserkraftgeneratoren kann bei Spannungsprüfungen ein Blindleistungsbedarf von einigen 100 kVAR erreicht werden. Im Vergleich dazu sind die Wirkverluste jedoch gering. Daher kann die Einspeiseleistung erheblich reduziert werden, wenn die kapazitive Blindleistung durch eine parallel oder in Reihe geschaltete Induktivität im Hochspannungskreis kompensiert wird. Im Resonanzfall muss dann nur noch die Verlustleistung des Prüflings und der Prüfeinrichtung aus dem Netz zugeführt werden. Der Gütefaktor Q einer Resonanzprüfeinrichtung, der in der Regel größer als 10 ist, gibt dabei das Verhältnis zwischen der Prüfleistung und der von der Speisequelle zu liefernden Verlustleistung an. Soll die Prüfung mit netzfrequenter Spannung durchgeführt werden, so muss die Induktivität feinstufig an die Kapazität des Prüflings angepasst werden können, um Resonanz zu erreichen. Technisch wird dies z.B. durch eine Drosselspule mit einstellbarem Kernluftspalt realisiert. Einige Hersteller fertigen aber auch Transformatoren mit verstellbarem Kernspalt, um das Bauvolumen zu reduzieren.

Grundsätzlich können für dielektrische Messungen und Spannungsprüfungen an Statorwicklungen sowohl Parallel- als auch Serienresonanzsysteme eingesetzt werden. Parallelresonanzanlagen sind jedoch wesentlich unempfindlicher gegenüber spannungsabhängigen Kapazitätsänderungen und hohen Teilentladungen und werden daher bevorzugt für Prüfungen an Ständerwicklungen eingesetzt. Sie können auch ohne oder mit sehr kleinen Kapazitäten des Prüflings betrieben werden, um z.B. bei Teilentladungsmessungen den Grundstörpegel des Messaufbaus zu bestimmen. Oberwellen und andere Störspannungen aus dem Versorgungsnetz sind bei Parallelresonanzanlagen durch Netzfilter und andere Maßnahmen zur Störunterdrückung aus der Versorgungsspannung zu entfernen.

Die Konfiguration einer Serienresonanzanlage bildet ein Tiefpassfilter und liefert daher auch bei Speisespannungen mit höheren Anteilen an Harmonischen eine saubere Sinusspannung. Der Kurzschlussstrom bei Durchschlag des Prüflings ist niedriger als bei Parallelresonanzanlagen. Frequenzvariable Serienresonanzanlagen, die mit Frequenzen zwischen 20 Hz und einigen 100 Hz arbeiten, werden mit Drosselspulen ohne Kernverstellung ausgeführt. Die Einstellung des Resonanzkreises erfolgt durch Frequenzverstellung. Frequenzvariable Serienresonanzanlagen werden hauptsächlich für die Vor-Ort-Diagnose und -Spannungsprüfungen an Netzkomponenten wie beispielsweise GIS/GIL/Schaltanlagen und Energiekabeln eingesetzt. Die Normen sehen jedoch keine Stehspannungsprüfungen an Ständerwicklungen mit Frequenzen vor, die stärker von der Netzfrequenz abweichen. Prüf- und Diagnoseeinrichtungen für den mobilen Einsatz an Ständerwicklungen von Generatoren unterschiedlicher Leistung und Bemessungsspannung sind Sonderanfertigungen. Die individuellen Anforderungen an solche Systeme müssen genau spezifiziert werden, um mit den Herstellern eine optimierte Ausführung zu erreichen.

3.2 Gleichspannungsprüfungen

Die Anforderungen an die Prüf- und Messeinrichtungen sind im IEEE-Std 95-2002 [5] ausführlich beschrieben, so dass hier nur einige Punkte hervorgehoben werden. Diese Anforderungen werden von handelsüblichen Prüfgeräten mit Rampenspannungsfunktion in jedem Fall erfüllt.

Die Ausgangsspannung von geregelten Hochspannungs-Gleichspannungsquellen darf auch bei Versorgungs- und Lastschwankungen nur geringfügig von der vorgegebenen Referenzspannung abweichen. Bei Prüfungen mit Rampenspannungsfunktion liegen die Isolationsströme im μA -Bereich. Wie das folgende Beispiel zeigt, können daher bereits kleine systembedingte Fehlerströme erhebliche Auswirkungen haben. Bei einer primärseitigen Spannungsänderung von 10 % und einer Netzregelung von nur 1% würde sich eine Ausgangsspannung von z.B. 10 kV um 10 V ändern. Erfolgt diese Änderung innerhalb von 10 Sekunden, so würde sich der Ladestrom eines Prüflings mit einer Kapazität von 1 μF um 1 μA ändern. Der kapazitive Ladestrom einer Kapazität von 1 μF beträgt bei einer Rampensteilheit von 1 kV / min 16,7 μA , so dass unter diesen Annahmen ein Messfehler von rund 6 % auftreten würde. Die Netzregelung sollte daher mindestens 0,1 Prozent oder besser sein.

Schon geringe Restwelligkeiten der Gleich-Hochspannung können bei großen Prüflingskapazitäten zu fehlerhaften Messungen der Isolationsströme führen. Für Maßnahmen zu ihrer Vermeidung wird auf [7] verwiesen.

3.3 VLF-Spannungsprüfung

Im Gegensatz zu Energiekabeln werden VLF-Prüfungen an Ständerwicklungen in Österreich, Deutschland und der Schweiz nur selten durchgeführt. Da die Anforderungen an die Prüf- und Messeinrichtungen im IEEE Std 433 [3] ausführlich beschrieben sind und von den Herstellern dieser Einrichtungen berücksichtigt werden, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

4 Einschränkungen, Anwendungsgrenzen

Da Spannungsprüfungen nur bedingt zerstörungsfrei sind, müssen genügend intakte Reservestäbe und ausreichend Zeit für notwendige Reparaturen vorhanden sein. Spannungsprüfungen sind daher zu Beginn geplanter Revisionen durchzuführen. An wassergekühlten Wicklungen dürfen Gleichspannungsprüfungen nur bei entleerten und sorgfältig getrockneten oder alternativ bei demontierten Wasser-Verbindungsschläuchen durchgeführt werden.

Nach den Empfehlungen im IEEE Std 95TM-2002 [7]) soll die Wicklungstemperatur bei der Gleichspannungsprüfung zwischen 10 und 40°C liegen. Diese Empfehlung wird im vorliegenden Merkblatt auch für Wechselspannungs- und VLF-Prüfungen übernommen. Um Überschläge zu vermeiden, müssen die Wickelköpfe gereinigt und trocken sein. Spannungsprüfungen sollten nur durchgeführt werden, wenn die in der ÖVE EN IEC 60034-27-4 [10] empfohlenen Mindestwerte für den Isolationswiderstand und den Polarisationsindex erreicht werden.

5 Auswertung, Beurteilung

Mit Stehspannungsprüfungen an Ständer- und Läuferwicklungen soll nachgewiesen werden, dass diese Prüfobjekte einem normativ festgelegten oder vereinbarten Prüfspannungswert über eine bestimmte Dauer standhalten, ohne dass ein Durchschlag der Isolierung auftritt. Die Anforderungen an die Messsysteme zur Messung der Prüfspannung und des Prüfstromes bei Gleich- und Wechselspannungsprüfungen sind in EN 60060-1 [6] festgelegt. VLF-Stehspannungsprüfungen mit 0,1 Hz-Sinusspannung sind in der EN 60034 und der EN 60060-1 nicht beschrieben. Aktuelle IEEE-Empfehlungen für die Durchführung solcher Prüfungen sind jedoch in [5] zu finden.

Durch- und Überschläge sind durch einen starken Anstieg der Prüfströme und einen Abfall der Prüfspannung erkennbar und führen zur Auslösung des Überlastungsschutzes der Prüfeinrichtung. Äußere Überschläge erfordern größere Abstände oder die Verwendung von Barrieren, bevor die Prüfung wiederholt werden kann. Überschläge entlang von Oberflächen können eine Reparatur erforderlich machen. Bei der Prüfung mit Gleichspannung reicht die gespeicherte Energie möglicherweise nicht aus, um eine ausreichend niederohmige Fehlerstelle zu erzeugen. Ist die Ortung der Fehlerstelle dadurch nicht möglich, muss der Fehlerwiderstand mit einem kurzschlussfesten Hochspannungs-Brenngerät reduziert werden.

Herkömmliche Stehspannungsprüfungen sind bedingt zerstörungsfrei und liefern, wenn sie bestanden werden, keine wesentlichen Informationen über den Zustand der Isolierung. Verbesserte Prüfmethode mit zusätzlichen Teilentladungsmessungen oder der bei Rampenspannungsprüfungen aufgezeichnete Strom-/Spannungsverlauf können jedoch zur Zustandsbewertung beitragen. Bei Spannungsprüfungen sind die Auslegungs- und Betriebsdaten des Prüfobjekts, die Wicklungs- und Umgebungstemperatur, die Umgebungsfuchte, das Prüfverfahren, der Scheitelwert und die Dauer der Prüfspannung sowie das Datum der Prüfung zu protokollieren. Bei Isolationsfehlern sind zusätzlich die Höhe und Dauer der zum Durchschlagzeitpunkt anliegenden Spannung, die Lage des Wicklungsstabes oder der Spule im Wicklungsstrang und die Position der Durchschlagstelle zu protokollieren.

6 Erfahrung

In Österreich werden seit mehr als 60 Jahren Spannungsprüfungen an Ständerwicklungen durchgeführt. In der Anfangszeit konnten dadurch die bis dahin häufigen Betriebsausfälle von Generatoren mit naturharzgebundenen Ständerwicklungen in Revisionszeiten verschoben werden. Bei den seit 1970 eingeführten kunstharzgebundenen Ständerwicklungen ist die Fehleranfälligkeit durch elektrische Alterung wesentlich geringer, so dass seitdem nur noch wenige Durchschläge bei Spannungsprüfungen aufgetreten sind. In vielen Fällen waren mechanische Beschädigungen der Isolierung durch Abrieb (z.B. Vibrationen gelockerter Statorbleche), durch Fremdkörper (z.B. Bruchstücke von Statorblechen) oder durch lokale Überhitzung (Weichlötverbindungen) die Ursache für Prüfdurchschläge. Einige Betriebsausfälle konnten jedoch auch durch Spannungsprüfungen nicht verhindert werden, da sich die Schwachstellen kurzzeitig durch lokale Überhitzungen der Wickelkopfisolationen an fehlerhaften Weichlotverbindungen entwickelten. Betriebsausfälle aufgrund dieser Fehlerursache konnten jedoch durch thermische Prüfungen auf ein Minimum reduziert werden.

Von einigen Betreibern wird befürchtet, dass Hochspannungsprüfungen die Wicklungsisolierung schädigen. Durch zahlreiche Untersuchungen an Wicklungsstäben und gebrauchten Wicklungen konnte jedoch empirisch nachgewiesen werden [1], dass Hochspannungsprüfungen bei intakten Wicklungen zu keinem relevanten Lebensdauerverbrauch führen.

Literaturverzeichnis

- [1] B. K. Gupta, H. G. Sedding, G. C. Stone and J. Stein, "Do Hipot Tests Damage Rotating Machine Insulation?," in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010.
- [2] E. 60034-18-42:2017, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 18-42: Teilentladungsresistente Isoliersysteme (Typ II) von drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden - Qualifizierungsprüfungen (IEC 60034-18-42:2017),“ 2017.
- [3] „IEC 60034-33:2023-4 Drehende elektrische Maschinen - Teil 33: Besondere Anforderungen an Synchrongeneratoren, angetrieben durch hydraulische Turbinen, einschließlich Motor-Generatoren (IEC 60034-33:2022); Deutsche Fassung EN IEC 60034-33:2022,“ 2023.
- [4] „IEC 60034-1:2022, Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance“.
- [5] „IEEE Std 433-2022: IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery with High Voltage Rating up to 30 kV at Very Low Frequency“.
- [6] „ÖVE/ÖNORM, EN 60060-1, Ausgabe: 2011-11-01: Hochspannungs-Prüftechnik Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen“.
- [7] „IEEE Std 95-2002: IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voaltage,“ 2002.

- [8] B. Gupta, G. Stone und J. Stein, „Stator Winding Hipot (High Potential) Testing,“ in *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, Canada, 2009.
- [9] T. Brügger, U. Ranninger, F. Öttl und M. Krüger, „Potential von VLF-TE-Messungen zur Stator diagnose an Hydrogeneratoren,“ in *VDE-Hochspannungstechnik*, Berlin, 2018.
- [10] „OVE EN IEC 60034-27-4 Ausgabe 2019-05-01: Messung des Isoaltionswiderstands und des Polarisationsindexes der Wicklungsisolierung drehender elektrischer Maschinen“.