

Die Entwicklung der HS-Prüf- und Messtechnik

K. Feser, Universität Stuttgart

Kurzfassung: Es wird über die Entwicklung der internationalen Normung in der HS-Prüf- und Messtechnik berichtet. Der Einfluß der Normung auf die Entwicklung der Messgeräte und Prüfanlagen für die Prüfung von Betriebsmitteln der Energieübertragungstechnik wird aufgezeigt. Die wichtigsten Entwicklungen in der HS-Messtechnik werden anhand von Beispielen gezeigt. Besonders betrachtet wird die Impulsmesstechnik und die Teilentladungsmesstechnik.

1. **Einleitung**

Hochspannungsprüfungen (HS-Prüfungen) werden als Routine- und Abnahmeprüfungen im Werk der Hersteller von hochspannungstechnischen Betriebsmitteln durchgeführt. Die Prüfungen sollen die Konstruktion, die Materialauswahl und den Fertigungsprozess kontrollieren. Nach dem Transport der Betriebsmittel an den Aufstellungsort erfolgt an allen Betriebsmitteln eine entsprechende Kontrolle. Eine HS-Prüfung Vor Ort wird an wenigen Betriebsmitteln (z.B. Kabeln, gasisolierten Schaltanlagen) durchgeführt. Diese Vor Ort-Prüfung wird nur dann für notwendig erachtet, wenn wesentliche Teile eines Betriebsmittels Vor Ort montiert bzw. gefertigt werden. Eine weitere HS-Prüfung kann nach einer Wartung bzw. Instandsetzung eines Betriebsmittels Vor Ort oder im Werk erfolgen, wobei die Prüfspannungen und Impulsformen so gewählt werden, dass die Alterung der Isolation des Betriebsmittels berücksichtigt wird.

Mit der Einführung der adaptiven Wartung müssen regelmäßige Kontrollen den Zustand der Isolation zu beurteilen erlauben. Hierfür sind online und offline Messungen notwendig, die über Trendanalysen, Korrelationen, Fingerprints u.a. eine Zustandserfassung erlauben, die eine Abschätzung des Fehlerrisikos (Restlebensdauer) im Normalbetrieb bzw. bei Überlast gestatten.

Die Fortschritte in der HS-Prüf- und Messtechnik sind im wesentlichen auf die Entwicklung der internationalen Normung, auf die technologische und informationstechnische Entwicklung der Prüfsysteme (z.B. der Mikroelektronik, der Werkstoffe) und die Qualitätsanforderungen unserer technisierten Gesellschaft zurückzuführen.

2. **Internationale Normen**

Die International Electrotechnical Commission (IEC) mit Sitz in Genf ist die autorisierte Organisation, die für die Entwicklung der elektrotechnischen Normen weltweit verantwortlich ist. Der globale Wettbewerb der Industrieunternehmen wird durch einheitliche, harmonisierte Normen gefördert, manchmal im Konflikt mit örtlich begrenzt handelnden Regierungen.

Für die HS-Prüf- und Messtechnik ist das Technical Committee TC 42 von IEC zuständig, das 1955 in London gegründet wurde und momentan 24 Länder als Mitglieder zählt. Die laufenden Arbeiten zur Normung werden in Maintenance Teams bearbeitet. (Tabelle 1).

	Publikation/Thema	Vorsitzender
MT 01	IEC 60052: Recommendations for voltage measurements by means of standard gaps	E. Gockenbach, Germany
MT 02	Amendment to IEC 60060 to include high voltage testing on site	W. Hauschild, Germany

Tabelle 1: Themen und Vorsitzende der laufenden MTs von TC 42 (6.2000)

Die wichtigsten Vorschriften von TC 42 (Tabelle 2) zur HS-Prüf- und Messtechnik, die im folgenden betrachtet werden, sind

IEC - 60060 - Part 2, IEC - 61083 - Part 1/2 und IEC 60270.

Anhand dieser Normen wird aufgezeigt, wie die Vorschriften zu neuen Prüfverfahren bzw. neuen Prüfgeräten (Produkten) führen.

Vorschrift	Thema	1. Ausgabe	Letzte Revision
IEC 60052	Recommendations for voltage measurements by means of standard gaps	1960	2. edition 42/151/CD 5.1999
IEC 60060	High voltage test technique Part 1: General definitions and test requirements Part 2: Measuring systems	1973 1976/77	1989 11.1994
IEC 60270	Partial discharge measurements	1968	2000
IEC 790	Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests	1984	in IEC 61083-1
IEC 833	Measurements of power-frequency electric fields	1987	
IEC 61083	Instruments and software used for measurements in high voltage impulse tests Part 1: Requirements for instruments Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse wave forms	08.1991 07.1996	2000
IEC 61180	HV test techniques for low voltage equipment Part 1: Definitions, test and procedure requirements Part 2: Test equipment	10.1992 06.1994	
IEC 61321-1 Report 2	HV Testing techniques with very fast impulses Part 1: Measuring systems for very fast front overvoltages generated in gas insulated metal-enclosed substations	09.1994	

Tabelle 2: Vorschriften von TC 42 (Stand 6.2000)

3. Impulsmesstechnik

Die IEC-Publikation 60060 bestand 1962 aus einer Vorschrift, wurde Anfang der 70er Jahre in vier Teile zerlegt, und 1989 bzw. 1994 wieder zusammengefasst in zwei Teile. Der Teil 2 "Messsysteme" von 1994 brachte einige wesentliche Änderungen für die HS-Messtechnik. In der Vorschrift von 1976 werden Spannungsteiler anhand des Übertragungsverhaltens durch die Auswertung der Rechteckstossantwort beurteilt. Die Antwortzeit für die Messungen von Blitzstossspannungen sollte für ein Messsystem kleiner als 200 ns sein. Diese Anforderung ist aber keineswegs ausreichend, da schwingende Systeme (z.B. kapazitive Teiler) praktisch eine sehr kleine Antwortzeit von wenigen ns haben und trotzdem für die Messung von Blitzstossspannungen ungeeignet sind.

Bei der Neufassung der Vorschriften (1994) konnte man sich nicht auf eine einfache Auswertung der Rechteckstossantwort einigen, so dass man der Vergleichsmethode zur Qualifizierung von Impulsspannungsteilern den Vorzug gab.

In der Vorschrift von 1994 ist deshalb die Vergleichsmethode als primäre Methode zur Qualifizierung von Messsystemen eingeführt. Um die Vergleichsmethode in der Praxis einführen zu können, benötigt man Referenzmesssysteme mit bestimmten Anforderungen an das Übertragungsverhalten. Da Referenzmesssysteme nur bis zu einigen 100 kV gebaut werden, musste der Linearitätsnachweis eingeführt werden. Alle verwendeten Messsysteme müssen rückführbar sein, und mit einem Record of Performance dokumentiert werden. Die Unsicherheiten bei Hochspannungsmessungen werden im Anhang H, der 1996 fertiggestellt wurde, erläutert. In der Praxis bereitet vor allem die Auswertung der Blitzstossspannungen Schwierigkeiten, wenn Oszillationen in der Front oder im Scheitel der Blitzstossspannung auftreten. Mit dieser Thematik beschäftigt sich momentan CIGRE 33-03 und eine TF von CIGRE SC 12 und 33.

Bei der anstehenden Revision von IEC 60060 Teil 1 und Teil 2 sind einige Ergänzungen bzw. Verbesserungen in Diskussion. Neben der Ergänzung um die Anforderungen an Vor-Ort-Prüfsysteme, für deren Bearbeitung bereits ein Maintenance Team berufen wurde, wird erneut die Feuchtekorrektur, vor allem bei niedrigen Spannungen und Oberflächenentladungen überarbeitet werden. In Diskussion sind auch die Auswerteparameter bei Impulsspannungen.

Die Erfahrungen mit der Vergleichsmethode werden insgesamt sehr positiv bewertet, so dass nur einige kleinere Ergänzungen bzw. Klarstellungen erwartet werden. Wenn man das physikalische Verhalten eines Marxschen Stossgenerators beim Durchzünden berücksichtigt, so muß klar sein, daß Spannungsteiler mit besserem Übertragungsverhalten Stirnswingungen zeigen, die z.B. mit Filter gedämpft werden. Das Abgleichen von gedämpft kapazitiven Spannungsteilern in weiten Frequenzbereichen ist schwierig und mit der Vergleichsmethode nicht messbar aber auch nicht notwendig. Problematisch bleibt weiterhin die Vergleichsmethode bei in der Stirn abgeschnittenen Blitzstossspannungen, besonders da das Abschneiden nicht-linear ist.

In der neu überarbeiteten Vorschrift IEC 61083-1 "Instruments and software used for measurements in high voltage tests. Part 1: Requirements for instruments" sind analoge und digitale Messgeräte in einer Vorschrift zusammengefasst, so dass die IEC 790 durch die neue IEC 61083-1 mit ersetzt wird. Ergänzt wurde die Vorschrift durch die Anforderungen an Kalibriergeräte. Falls die Auswertung von Impulsspannungen neue Definitionen für die Impulsparameter bringen wird, muss auch die Vorschrift IEC 61083-2, die die Software für die Auswertungen zur Verfügung stellt, neu gefasst werden und um nicht-konventionelle Impulsformen, wie sie z.B. bei der Stossspannungsprüfung von Niederspannungswicklungen von Transformatoren auftreten, ergänzt werden. Bei den am Markt befindlichen Transientenrekordern für Stossspannungsprüfungen ist neben der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) die digitale Signalverarbeitung (Filterung, FFT, Fensterung u.a.) jeweils besonders zu überprüfen. Hierfür sind neben geeigneten Kalibriergeräten auch entsprechende Prüfverfahren notwendig, wie sie z.B. für die EMV im Anhang von IEC 61083-1 beschrieben werden. Dadurch wird auch eine Beurteilung eines Prüfergebnisses durch den Vergleich von z.B. Übertragungsfunktionen bei der Prüfung von Transformatoren möglich, da das Vertrauen in die digitale Signalverarbeitung objektiv nachweisbar wird. Momentan dient die Signalverarbeitung mit z.B. FFT, Wavelets, Neuronalen Netzen, Fraktals der zusätzlichen Auswertung und internen Beurteilung.

4. Teilentladungsmesstechnik

Für die Beurteilung der Qualität einer Isolierung eines Betriebsmittels wird die Teilentladungsmessung während der Wechselspannungsprüfung herangezogen. Aus der Erfahrung wurden für die einzelnen Betriebsmittel Grenzwerte der scheinbaren Ladung festgelegt, die bei der Prüfung nicht überschritten werden. Die Teilentladungsmesstechnik (TE-Messtechnik) wurde in der Vorschrift IEC 60270 im Jahre 1968 zum ersten Mal auf die "scheinbare" Ladung ausgerichtet. Bis zu diesem Zeitpunkt dominierte die Störspannungsmesstechnik in μV die Erfassung von Teildurchschlägen in Isolierungen. Im Jahre 1981 erfolgte die erste Revision der IEC 60270. Es wurde die Kalibrierung des Messkreises, die Anforderungen an die Empfindlichkeit und Genauigkeit der Messinstrumente sowie die TE-Messtechnik bei Gleichspannungsprüfungen aufgenommen. Die neueste Revision von IEC 60270, erschienen im Jahre 2000, ist durch die digitale TE-Messtechnik ergänzt. Zusätzlich erfolgten Klarstellungen in der Kalibrierung, so dass vergleichbare Ergebnisse mit verschiedenen TE-Geräten erzielbar sind. Die Anforderungen an TE-Instrumente wurden ausführlich formuliert und die Rückführbarkeit aller Kalibrierprozesse und deren Protokollierung im Record of Performance wurden festgelegt. Im geschirmten Prüffeld ist damit eine empfindliche TE-Messung möglich, die auch kalibrierbar und vergleichbar ist. Eine Bewertung der Messergebnisse ist nur möglich, wenn auch der Ort der TE bekannt ist.

Für den Vor Ort-Einsatz der TE-Messtechnik müssen die Umgebungsstörungen reduziert werden. Mit analogen bzw. digitalen Filtern für sinusförmige Störer bzw. speziellen Messverfahren für impulsförmige Störer (digitale Brückenschaltung, Richtkoppler, UHF-Messtechnik, akustische Messtechnik) können diese ausgeblendet bzw. unterdrückt werden und damit hohe Empfindlichkeiten erreicht werden. Einige dieser Verfahren sind nicht kalibrierbar, so dass der Vergleich mit Prüffeldergebnissen und mit der Bewertung der Signale schwerer fällt. Statistische bzw. neuronale Verfahren der Mustererkennung werden zur Weiterentwicklung der TE-Bewertung beitragen.

5. HS-Prüftechnik

Die heutigen Trends in der HS-Prüftechnik im Werk sind gekennzeichnet von Stossspannungsanlagen mit Filternackkreisen zur Erhöhung des Belastungsbereichs bzw. zur Reduzierung des Überschwingens bei Blitzstossspannungen und von Wechselspannungsanlagen, teilweise mit Resonanzverhalten, die in Fertigungsprozesse integriert werden.

Die Vor Ort-Prüftechnik wird in Zukunft zunehmen, da viele Betriebsmittel im Netz mittlerweile über 30 Jahre in Betrieb sind und ihre Restlebensdauer aus wirtschaftlichen Überlegungen abgeschätzt werden muss. Neue Betriebsmittel, die im Werk nicht geprüft werden, wie z.B. gasisolierte Schaltanlagen bzw. Kabel und Kabelzubehör sollten vor der Inbetriebnahme einer HS-Prüfung mit empfindlicher TE-Messung unterzogen werden. Dies gilt auch für alle Betriebsmittel nach einer Vor Ort-Reparatur. Hierfür ist eine Ergänzung der IEC 60060-1/2 notwendig, die die verschiedenen Aspekte der Vor Ort-Prüftechnik in einer Vorschrift Rechnung tragen soll. Neben der höheren Störproblematik bei empfindlichen Messungen durch die fehlenden Abschirmungen ist es vor allem der Leistungsbedarf von Prüfanlagen, so dass Vor Ort bei Impulsspannungen wie bei Wechselspannungsprüfungen Resonanzanlagen zu bevorzugen sind. Die Vorschriften sollten darauf in den zulässigen Toleranzen und Impulsformen abgestimmt werden. Aus Sicherheitsgründen werden gekapselte Prüfanlagen Vor Ort zumindest bei gekapselten Anlagen bevorzugt. Eine in eine Anlage integrierte Prüftechnik, z.B. Trennerschaltungen in gasisolierten Anlagen zur Überprüfung der Festigkeit gegenüber sehr schnellen Überspannungen bzw. der EMV der Sekundärkreise, wird nur in Sonderfällen eingesetzt, da nicht jede wünschbare Prüfschaltung realisierbar ist. Die Amplituden der Vor Ort-Prüfspannungen sollten die Eigenschaften der verwendeten Isoliersysteme, die eingesetzte Mess- und Prüftechnik und das statistische Systemverhalten berücksichtigen. Zum Beispiel erscheint eine Vor Ort-Prüfung einer gasisolierten Anlage mit einer Wechselspannung, die einer Amplitude von 0,36 mal dem Blitzstossspannungspegel entspricht, zusammen mit einer empfindlichen TE-Messung mit einem Störpegel unterhalb von 2 pC ausreichend, um sowohl die Wechselspannungsfestigkeit wie auch die Stossspannungsfestigkeit nachzuweisen.

6. Schlußfolgerungen

Die Vor Ort-Prüftechnik wird zunehmen und sollte deshalb sowohl in den Vorschriften als auch in der Anwendung weiter entwickelt werden. Es sind hierfür neue Prüfverfahren und weiter entwickelte Messverfahren notwendig, die speziell auf die Vor Ort-Bedingungen Rücksicht nehmen. Erweiterte Toleranzen und Resonanzverfahren zur Erzeugung der Prüfspannungen erleichtern die Anwendung in der Praxis ebenso wie um die Vor Ort-Prüftechnik erweiterte Vorschriften.

Im Prüffeld hat sich die Vergleichsmethode für die Qualifizierung von Messmitteln durchgesetzt. Die Rückführbarkeit der Messgrößen auf nationale Normale wird durch die allgemeinen Qualitätsanforderungen und die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen in einem globalen Markt sich weiter durchsetzen. Verfahren der Signalverarbeitung und Mustererkennung werden in der Bewertung von Prüfergebnissen an Bedeutung gewinnen.