

HS-Prüf- und Meßtechnik 2000

K. Feser

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Es werden Trends in der Entwicklung der Hochspannungsprüftechnik und in der Hochspannungsmeßtechnik aufgezeigt. Diese Trends werden durch neue internationale Vorschriften ausgelöst, die den technischen Entwicklungen folgen oder diese vorbereiten. Sehr schnelle transiente Vorgänge mit Anstiegszeiten im ns-Bereich werden neue Entwicklungen in der Prüf- und Meßtechnik erfordern. Die Tendenz zu mehr Vor-Ort-Prüfungen, um eine lückenlose Qualitätssicherung zu ermöglichen, hat ebenfalls Entwicklungen in der entsprechenden Prüf- und Meßtechnik zur Folge, wobei auch neue Prüfverfahren zu überlegen sind. Außerdem wird der Fortschritt bestehender Prüf- und Meßtechniken durch Entwicklungen bei den Werkstoffen, in der Mikroelektronik und in der Informatik beeinflußt.

1. Einleitung

Der Stand der Hochspannungsprüf- und Meßtechnik wird wesentlich durch die Weiterentwicklung der internationalen Vorschriften (IEC-Vorschriften), durch die technologische und systemtheoretische Weiterentwicklung der Betriebsmittel und Systeme sowie der durchgehenden Qualitätssicherung von der Entwicklung bis zur Inbetriebnahme eines Betriebsmittels beeinflusst. Neue, verbesserte Werkstoffe, Fortschritte in der Nanoelektronik, der Mikrosystemtechnik einschließlich der Mikroelektronik, der Optoelektronik, der Informatik sowie der Organisation und Aufteilung der Arbeit werden es ermöglichen, daß Fertigungsverfahren und -abläufe genauso kritisch betrachtet und optimiert werden können wie die Anforderungen an Betriebsmittel oder Systeme. Ziel wird die Optimierung des Gesamtsystems sein, wobei alle Teilsysteme durch moderne Verfahren der Kontrolle und Überwachung bis zur maximalen Ausnutzung betrieben werden. Ressourcen unter gesamtwirtschaftlichen, teilweise sicher auch politischen Gesichtspunkten einzusetzen, wird die Zielvorstellung vieler Entwicklungen sein.

In der elektrischen Energieübertragung, dem wesentlichen Motor für Neuentwicklungen in der HS-Prüf- und Meßtechnik, zeichnet sich bei den Übertragungsspannungen eine wirtschaftliche und technologische Grenze ab, die mit den heute realisierten Übertragungsspannungen von 1200 kV für Drehstromübertragungen und ± 800 kV für Gleichstromübertragungen erreicht sein dürfte. Ein vollkommenes Umdenken in der Prüftechnik wäre nötig, falls die Supraleitung für die Energieübertragung eingesetzt werden könnte. Aus heutiger Sicht ist dies in den nächsten 30 Jahren nicht zu erwarten. Genausowenig ist eine vollkommen dezentrale Energieversorgung auf der Basis alternativer Energiequellen (Wind, Photovoltaik), zumindest aus technischer und wirtschaftlicher Perspektive, zu erwarten. Damit wird die elektrische Energieübertragung, zumindest zur Erschließung großer Wassermengen, z. B. am Amazonas, in Sibirien oder in Zentralafrika, und zur Verteilung dieser Energiemengen in Form von elektrischer Energie in den Verbraucherschwerpunkten, sowie zur Reservehaltung durch Netzzusammenschlüsse, weiterhin bestehen und die Energieversorgung zu Beginn des kommenden Jahrhunderts wesentlich bestimmen.

Eine Zunahme von HS-Gleichstromübertragungen, Gleichstromkurzkupplungen und Betriebsmitteln, die mit Leistungselektronik geregelt werden (FACTS), integriert in die Drehstromnetze, verleiht den Drehstromnetzen eine höhere Stabilität und gestattet einen wirtschaftlicheren und technisch optimierten Betrieb. Geringere Schaltüberspannungen können vor allem durch die Leistungselektronik erwartet werden. Zusätzlich wird moderne Sensorik und Elektronik den "intelligenten" Schalter im Drehstromnetz ermöglichen, so daß auch durch diese Maßnahme mit geringeren Schaltüberspannungen zu rechnen sein wird. Weiterentwickelte Schutzgeräte mit geringer Streuung und mit stark nichtlinearer Charakteristik werden zu sicheren Schutzsystemen entwickelt, die es gestatten, auch den Blitzüberspannungspegel herabzusetzen. Dies wird sich auf die Dimensionierung der HS-Betriebsmittel insofern auswirken, als die Dimensionierung gegenüber Überspannungen näher an die Dimensionierung für die Dauerbeanspruchung heranrücken wird.

Betriebsmittel werden kompakter und damit wirtschaftlicher. Die dadurch verstärkte Betriebsbeanspruchung wird durch "intelligente" Überwachungseinrichtungen kontrolliert und zu einer insgesamt erhöhten Verfügbarkeit führen. Gelingt zusätzlich die Speicherung elektrischer Energie, in beispielsweise supraleitenden Spulen, dürfte sich die elektrische Energieverteilung mit Übertragung in der heutigen Form wirtschaftlich behaupten und auch im nächsten Jahrhundert unsere Energieversorgung wesentlich bestimmen.

2. Neue Vorschriften

Weiterentwickelte bzw. neue Vorschriften haben einen direkten Einfluß auf die HS-Prüf- und Meßtechnik, wobei heute weltweit nach den IEC-Vorschriften entwickelt und geprüft wird. Neue Vorschriften bedingen oft auch neue Produkte in der Prüftechnik. Die im Herbst 1994 neu erschienene Vorschrift IEC-Publikation 60-2 "High Voltage Test Technique. Part 2: Measuring Systems" bedeutet für die Hochspannungsprüftechnik eine vollkommene Umstellung. Alle Hochspannungsmeßsysteme müssen über Vergleichsmessungen kalibriert werden. Hierzu war es notwendig, geeignete Referenzsysteme mit bestimmten Eigenschaften zu entwickeln. Auch der notwendige Nachweis der Linearität eines Meßsystems führte zu neuen Produkten in der Prüftechnik.

Die Vorschrift IEC Publikation 1083-1 "Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests. Part 1: Requirements for Digital Recorders" von 1991 bewirkte die Neuentwicklung von Impulskalibratoren, um digitale Meßgeräte wirtschaftlich überprüfen zu können.

Die Anwendung von SF₆-Anlagen führte in den 80er Jahren sowohl bei den SF₆-Anlagen wie auch bei angeschlossenen Betriebsmitteln zu unerwarteten Schwierigkeiten. Durchschläge in SF₆-Anlagen durch Trennerschaltungen, Störungen in der Sekundärtechnik von SF₆-Anlagen durch Schaltvorgänge und Durchschläge in angeschlossenen Betriebsmitteln von SF₆-Anlagen brachten die Erkenntnis, daß die Festigkeit von Isolationssystemen auch bei sehr schnellen transienten Vorgängen im ns-Bereich zu überprüfen ist. Auch die Kopplungen zwischen den Primärsystemen und dem Sekundärsystem war neu zu überdenken. Eine Arbeitsgruppe vom IEC TC 17 hat daraufhin einen Prüfkreis entwickelt, der die Vorgänge bei Trennerschaltungen simulieren kann, und eine Arbeitsgruppe vom IEC TC 42 hat in einem IEC-Report No 1321-1 von 1994 erste Ansätze für eine Prüftechnik und eine Meßtechnik bei sehr schnellen Vorgängen erarbeitet. Im Augenblick wird auch in der CIGRE-Arbeitsgruppe WG 33/23-12 die Vor-Ort-Prüftechnik von SF₆-Anlagen diskutiert und weiterentwickelt. Dabei wird ein völlig neuer Ansatz verfolgt. Die Prüfung mit Wechselspannungen soll auf die dimensionierende Blitzstoßspannung (z. B. $U_{rms, WS} = 0,36 \cdot U_{BS}$) bezogen werden. In Zukunft dürften solche Überlegungen bei der Neufassung von Vorschriften vermehrt Eingang finden, und die Prüfung dürfte den tatsächlichen Beanspruchungen angemessener sein. Verbesserte Modellbildung und Rechenverfahren, welche die tatsächlichen Beanspruchungen zu ermitteln gestatten, werden dies unterstützen. Vom IEC-TC 28 "Insulation coordination" wurden die Steilstoßspannungen als dimensionierende Parameter für Betriebsmittel in die neue Vorschrift IEC Publikation 71-1 "Insulation Coordination. Part 1: Definitions, Principles and Rules" von 1993 aufgenommen. Jedes für ein Betriebsmittel verantwortliche TC wird bei der Überarbeitung der bestehenden Vorschriften, die alle fünf Jahre neu überdacht werden sollen, die Steilstoßspannungen berücksichtigen. Neu in die Bearbeitung aufgenommen wird vom IEC-TC 28 die Isolationskoordination von Gleichspannungsanlagen, womit neben den Betriebsgleichspannungen auch die Überspannungen genormt werden dürften. Eine entsprechende Prüftechnik wird folgen.

3. Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung im Entstehen und Betreiben von Produkten und Systemen wird schon aus rechtlichen Gründen eine zunehmende Bedeutung erfahren. Die Prüf- und Meßtechnik ist ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung. Um die Kosten dabei zu überwachen, sollte die Kontrolle so früh wie möglich erfolgen, integriert in die Entwicklung bzw. in die Fertigung. Diese Tendenz führt dazu, daß man in Zukunft wesentlich mehr Prüf- und Meßtechnik, zugeschnitten auf ein Produkt, in den Fertigungsablauf integrieren wird. Aus sicherheitstechnischen Gründen werden hier vor allem berührungssichere, d. h. gekapselte Prüfanlagen an Bedeutung gewinnen. Bisher wird diese Technik bereits für die Wechselspannungsprüfung von SF₆-Anlagen im Werk angewendet; in der Stoßspannungsprüfung scheiterte die Anwendung bisher an wirtschaftlichen Überlegungen, wobei die Tendenz zur Gruppenarbeit einschließlich der Prüfung auch in der elektrotechnischen Industrie diskutiert und erwogen wird.

Ein Aspekt der Qualitätssicherung ist auch der Einsatz neuer Werkstoffe, um Produkte besser oder kostengünstiger herzustellen. Während für die HS-Prüfanlagen diese Entwicklung kontinuierlich und ohne spektakuläre Ergebnisse verläuft, ist der Einsatz neuer Komponenten in der HS-Meßtechnik, einschließlich neuer Softwaremodule, unter dem Aspekt einer Qualitätssicherung kritischer zu sehen (siehe Punkt 5). Sowohl bei den Hohlzylindern als auch bei den Abspannungen wurde Porzellan als Werkstoff in den Prüfanlagen vollkommen durch glasfaserverstärkte Epoxidharze ersetzt, die unter Vakuum vergossen werden. Anlagen dieser Konstruktion weisen ein geringeres Gewicht auf und sind doch zugleich geeignet, auch größere Erschütterungen (z. B. bei Erdbeben) unbeschadet zu überstehen. Als Isoliermedium ist im Hochspannungsbereich immer noch Öl/Papier vorherrschend, wobei bei hohen geforderten Speicherdichten mit Gleichspannungs- und Stoßspannungsanwendungen Rizinusöl verwendet wird. Ein Ersatz dieses Dielektrikums durch Folien/SF₆ ist nur für Spezialanwendungen, z. B. in der SF₆-Anlagen-Prüftechnik, wirtschaftlich vertretbar.

4. Vor-Ort-Prüftechnik

Die Qualitätssicherung endet für den Hersteller mit der Übergabe des Betriebsmittels an den Betreiber. Der Betreiber möchte die Nutzungsdauer seiner Betriebsmittel und Systeme möglichst verlängern. Beide Gesichtspunkte führen dazu, daß die Vor-Ort-Prüftechnik von Betriebsmitteln erheblich zunehmen wird; man denke beispielsweise nur an die Betriebsmittel, die jetzt seit 20 bis 30 Jahren in Betrieb sind. Falls eine Vor-Ort-Prüfung des Isolationszustandes der Betriebsmittel Auskunft darüber gäbe, wie die Nutzungsdauer ohne erhöhtes Risiko nur um wenige Jahre zu verlängern wäre, so wäre der wirtschaftliche Anreiz, etwa bei Transformatoren, sofort einzusehen. Bei Betriebsmitteln, die erst Vor-Ort in ihrer endgültigen Ausführung entstehen, ist heute bereits eine Vor-Ort-Isolationsprüfung fast selbstverständlich. Die Prüfung scheitert oft nur an den fehlenden Prüfmöglichkeiten. Für alle Produkte der Energietechnik wird die Vor-Ort-Prüfung nach der Montage bzw. nach einer Reparatur oder einer Diagnose durch eine Überwachungseinrichtung erheblich zunehmen. Hierfür werden gekapselte bzw. zerlegbare Prüfanlagen in robuster, einfacher Konstruktion entwickelt werden. Auch die dazugehörige Meßtechnik muß einfach und bedienerfreundlich sein und sollte aussagefähige Größen bewerten, die die Entscheidung über das weitere Vorgehen erleichtert. Dies ist eine äußerst schwierige Arbeit, die noch viele Forschungen und Entwicklungen auslösen wird. Heute ist die HS-Isolationsprüfung als Vor-Ort-Prüfung bei SF₆-Anlagen und Kabelanlagen gefordert. Eine Teilentladungsmessung während der Wechselladungsprüfung, die den Isolationszustand wesentlich besser zu beurteilen gestattet, scheitert heute noch an der teilweise fehlenden Empfindlichkeit der TE-Messung. Erste Ansätze, Betriebsmittel für die Vor-Ort-Prüfung im System dauernd zu integrieren, unterstützen diesen Trend. Dies muß heute sicherlich wirtschaftlich über die Nutzungsdauer gerechtfertigt sein. Beispielsweise kann man einen magnetischen Spannungswandler in SF₆-Anlagen als Prüftransformator für die Vor-Ort-Prüfung dimensionieren. Kabel verlegter Kabelanlagen können beispielsweise als Energiespeicher für die Vor-Ort-Prüfung von Endverschlüssen verwendet werden. Die Kontrolle des Isolationszustandes der Kabel erfolgt dabei ebenfalls über eine TE-Messung bei den transienten Prüfspannungen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Betriebsmittel und Anlagen kompakter werden und damit ihre Auslegung näher an die physikalischen Grenzen gelegt werden. Dieser Trend bedingt eine Prüftechnik, die die tatsächlichen Beanspruchungen simulieren kann und dies, so weit wie möglich, im endgültigen Betriebszustand. Eine "Vorprüfung" an Teilsystemen mit erhöhten Beanspruchungsparametern ist wahrscheinlich notwendig, kann die endgültige Überprüfung aber nicht vollkommen ersetzen. Eine On-line-Überwachung kann diese Überlegungen wirkungsvoll ergänzen.

5. HS-Meßtechnik

Auf dem Gebiet der HS-Meßtechnik und der Steuerung von Prüfanlagen hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung stattgefunden. Die Digitaltechnik und der PC haben die Meßtechnik und ihre Auswertemöglichkeiten völlig verändert. Für den im Prüffeld tätigen Ingenieur hat sich dabei ein ungeheurer Wandel vollzogen. Waren es vor 10 bis 20 Jahren noch die Wünsche des Prüffeldingenieurs, die eine Entwicklung ausgelöst und eine Technologie vorangebracht haben, so müssen wir heute feststellen, daß die technischen Möglichkeiten heute in vielen Bereichen die unmittelbaren Prüfbedürfnisse bei weitem übersteigen und mit großem Tempo noch weiter wachsen. Je nach Veranlagung kann dies für den Anwender, vor allem aber für den Entwickler von HS-Meßtechnik als "Frustration" empfunden werden, wenn er feststellen muß, daß seine mühsam erarbeiteten technischen Erkenntnisse gegenüber Marktüberlegungen eine untergeordnete Rolle spielen. Für andere Ingenieure ist dies eine Herausforderung, immer neue Produkte zu realisieren bzw. anzuwenden. Diese extreme Verkürzung der Produkterneuerungszyklen hat aber Nachteile für den Anwender, z. B. im Bereich der Wartung. Angesichts des Preisverfalls und der Verfügbarkeit elektronischer Komponenten ist der Hersteller aber aus Wettbewerbsgründen oft gezwungen, Produkte neuester Technologie mit erhöhter Leistungsfähigkeit zu verwenden, da diese billiger hergestellt werden. Aus der Sicht prüftechnischen Anwendung wäre dies überhaupt nicht nötig, der Wettbewerb aber fördert diese für den Anwender und den Hersteller unbefriedigende Situation. Besonders etablierte Hersteller mit traditioneller Produktpalette und großen Unterhaltsverpflichtungen haben ihre Schwierigkeiten, wenn junge Unternehmer, unbelastet von der Vergangenheit, im geeigneten Moment mit neuer Technologie auf den Markt der Meß- und Steuerungstechnik kommen, vor allem da die Meßtechnik im Bereich Hardware auf den PC aufbaut und die Software eine rasante Entwicklung erlebt, wo keine größeren Investitionen nötig sind. Ein Ärgernis für den Anwender ist dabei die Fehlerhäufigkeit eines großen Teils der auf dem Markt angebotenen Software und das damit verbundene Update-Wesen. Ein Ende dieser Situation ist durch die weitere Entwicklung der Mikroelektronik, Optoelektronik und Informatik noch nicht abzusehen.

In der HS-Meßtechnik haben sich die klassischen Meßaufgaben bewährt. Mit neuer Technologie werden Steuerungen bzw. Meßgeräte angeboten, heute meist auf PC-Basis. Damit sind vollautomatische Prüfanlagen realisiert, und der Prüffeldingenieur kann sich seiner Hauptaufgabe, der Interpretation der Ergebnisse, widmen. Aber auch hier unterstützen Expertensysteme auf der Basis von statistischen Parametern, Neuronalen Netzen oder Fuzzy-Logic den Anwender. Heute sind diese Systeme in ersten Erprobungen, in 10 Jahren dürften diese Systeme die Arbeit des Prüffeldingenieurs bei der Fehlersuche wesentlich erleichtern. Wichtig für den Anwender ist die Visualisierung der Prüfergebnisse, d. h. die richtige Auswahl von Daten und die entsprechende anschauliche Darstellung. Die Meßergebnisse werden heute digital aufgezeichnet und sofort on-line weiterverarbeitet, so daß ein Prüfergebnis praktisch in Echtzeit vorgelegt wird. Die Messungen des Spannungsverlaufes bzw. des Stromverlaufes können im Zeitbereich oder im Frequenzbereich ausgewertet werden. Eine FFT ist innerhalb weniger 10 ms durchgeführt.

Meßverfahren mit höherer Empfindlichkeit müssen vor allem für die Vor-Ort-TE-Meßtechnik weiterentwickelt werden. Die TE-Meßtechnik im Werk basiert in der Regel auf der IEC-270. Das Meßverfahren ist bei entsprechendem Prüfaufbau sehr empfindlich und gestattet die Beurteilung der Isolation durch den Prüffeldingenieur. Die Weiterverarbeitung der digital vorliegenden Information mit Verfahren der künstlichen Intelligenz bietet sich an und wird in einigen Jahren Stand der Technik sein. Heute wird meist nur die Amplitude einer TE und manchmal ihre Phasenlage zur Prüfspannung betrachtet. Damit ist eine Ortung und eine Aussage über die Art des Fehlers nur bedingt möglich.

Die TE-Meßtechnik wird allgemein als die wichtigste Meßmethode für die Beurteilung einer Isolation angesehen. Um die TE-Meßtechnik auch Vor-Ort anwenden zu können, sind für die

IEC 270-Methode geeignete Störunterdrückungsalgorithmen für die wichtigsten Umgebungsstörer zu entwickeln. Die heutige digitale Meßtechnik bietet hierfür die Möglichkeiten, sinusförmige und impulsförmige Störer mit geeigneten Verfahren zu erkennen und zu beseitigen (siehe spätere Beiträge). Schwierigkeiten bereiten Koronastörungen; erste Ansätze für die Lösung dieser Aufgabe werden im Laufe des Symposiums vorgestellt. Aber auch an neuen Meßverfahren für die TE-Messung im Betrieb wird intensiv gearbeitet. Neben den elektrischen Verfahren bei höheren Frequenzen (VHF, UHF) wird auch die akustische TE-Messung für die Ortung von TE in SF₆-Anlagen weiterentwickelt. Einige Beiträge zu diesem Symposium werden den Stand der Technik und die Weiterentwicklung aufzeigen. In einigen Jahren dürfte auch die TE-Meßtechnik Vor-Ort für eine Vor-Ort-Prüfung bzw. eine Vor-Ort-Überwachung von Betriebsmitteln einsetzbar sein.

Ein sehr interessantes Verfahren für die Beurteilung des Isolationszustandes von Betriebsmitteln ist die Übertragungsfunktion. Momentan eingesetzt bei der Blitzstoßprüfung von Transformatoren im Werk, könnte diese Methode auch für die Vor-Ort-Prüfung und Überwachung von Betriebsmitteln von Interesse sein. Über erste Ergebnisse mit dieser Meßmethode wird in einem eigenen Beitrag berichtet werden.

Die HS-Meßtechnik, erfolgreich im Labor oder Vor-Ort eingesetzt, muß die starken elektromagnetischen Störspannungen, die von Durchschlags- oder Schaltvorgängen ausgehen, beherrschen. Abschirmungen, Filter und Erdungsmaßnahmen müssen richtig und wirtschaftlich eingesetzt werden. Auf diesem Gebiet hat der erfahrene Prüffeldingenieur Kenntnisse, die ihm beim Einsatz digitaler Meßtechnik mit ihren niedrigen Signalpegeln von < 10 V helfen, die Störprobleme zu lösen.