Anforderungen an eine Vor-Ort Messung von Kapazität und Verlustfaktor

P. Schikarski, T. Grun
Haefely Test AG, Tettex Instruments Division, Dietikon/Zürich, Schweiz

Kurzfassung

Eines der am längsten etablierten und daher wichtigsten Kriterien zur Bewertung einer Hochspannungsisolierung ist nach wie vor die Kapazität (C) und der Verlustfaktor (tanδ). Aufgrund der langen Erfahrung kann der Zustand von Isolierungen gut eingeschätzt werden, wenn diese beiden Messgrössen bekannt sind. Daher werden sie im Labor, nach der Herstellung und auch unter Vor-Ort Bedingungen gemessen. Für die Vor-Ort Messung ergeben sich besondere Anforderungen und Schwierigkeiten, die in diesem Beitrag behandelt werden. Stichworte sind hierbei insbesondere:

- Störunterdrückung
- Besonderheiten bei starr geerdeten Prüflingen
- Einfache Handhabung des Messgerätes
- Bewertung der Isolierung unterstützt durch eine Datenbank

Die Problematiken der Vor-Ortmessung von Kapazitäten und Verlustfaktor sowie deren Lösungsmöglichkeiten werden aufgezeigt und diskutiert.

1. Einleitung

Mit zunehmenden Alter von Leistungstransformatoren in den elektrischen Energieversorgungsnetzen und dem zunehmenden Kostendruck, dem die Netzbetreiber unterworfen sind, stellt sich immer häufiger die Frage, wie lange kann ein betriebsgealterter Transformator noch sicher und effizient im Netz betrieben werden. Zur Beurteilung des Alterungszustandes eines Leistungstransformators nebst seinen Durchführungen stehen eine Vielzahl von Diagnosemethoden zur Verfügung, wie z.B.:

- Öl Analyse / Gas-in-Öl Analyse
- Messung des Verlustfaktors / Kapazität (C & tan δ)
- Messung der Polarisationseffekte (Return Voltage Measurement „RVM"; Polarisation- Depolarisation-Current „PDC")
- Messung der Transferfunktion „FRA"

Die C & tan δ Messung ist ein wichtiges Puzzlestück zur Beurteilung des Alterungszustandes eines Isolationssystems. Insbesondere da für diese Diagnosemethode, im Gegensatz zu anderen Methoden, in den meisten Fällen Messdaten aus der Vergangenheit rückgehend bis zu dem Herstellungsjahr des Betriebsmittels zur Verfügung stehen und damit für eine Trendanalyse genutzt werden können. Die Anforderungen an ein C & tan δ Diagnosegerät für den Vor-Ort Einsatz wird anhand zwei Ausführungsbeispielen und deren Umsetzung in ein neu entwickeltes, kompaktes Feldgerät erläutert.

2. Anforderungen an ein Vor-Ort Diagnose Gerät

Im Gegensatz zu Labormessungen, wird Vor-Ort die Messung durch wesentlich extremere und nicht beeinflussbare Randbedingungen bestimmt. Insbesondere in Unterstationen von Hoch- und Höchstspannungsnetzen herrschen Bedingungen vor, die präzise Messungen durch elektrische und magnetische Störfelder erschweren oder sogar verhindern.
Des weiteren ist bei einer Vor-Ort Messung der Messaufbau durch die feste Installation des Prüflings innerhalb einer Unterstation vorgegeben. Typischerweise sind Leistungstransformatoren einseitig geerdet, was bei einer C & tan δ Messung unbedingt berücksichtigt werden muss.
Die Prüfmittel müssen zum Prüfobjekt gebracht werden. Gerade hier muss darauf geachtet werden, dass das Diagnosesystem leicht zu Transportieren und sehr einfach zu Bedienen ist. Gewicht, Dimensionen und Bauform sollte so ausgeführt sein, dass das Messgerät leicht von einer einzigen Person zum Prüfobjekt transportiert werden kann. Die leichte Bedienbarkeit ist in sofern wichtig, da zum einem durch Licht- und Witterungsverhältnisse das Bedienen eines Messgerätes umständlich sein kann und zum Anderen eine Diagnosemessung aus Effizienz- und Kostengründen auch durch weniger ausgebildetes Servicepersonal durchgeführt werden sollte. Da für eine Off-Line Diagnosemethode das Prüfobjekt freigeschaltet werden muss, bietet es sich an diese Messungen im Rahmen einer Vor-Ort Wartung durchzuführen. In vielen Fällen ist der Zeitplan für eine Wartung knapp bemessen. Eine Diagnosemessung nebst der Anbringung der Mess- und Prüfkabel sollte nicht länger als eine Stunde dauern, so

dass alle durchzuführenden Diagnosemessungen innerhalb eines Tages abgearbeitet werden können.
Ein weiterer wichtiger Aspekt, der bei der Entwicklung eines Diagnosesystems bedacht werden muss, ist die Reproduzierbarkeit bzw. Genauigkeit der Diagnosemessungen. Dies heisst, die lokale Platzierung des Messsystems, die unterschiedliche Führung der Messleitungen und veränderte Umgebungseinflüsse dürfen das Messergebnis nicht beeinflussen. Nur so kann garantiert werden, dass Messergebnisse mit denen der Vergangenheit verglichen werden können und deren Abweichung eindeutig auf eine Veränderung des Isolationssystems des Prüfobjektes rückführbar ist.
Auch Umwelteinflüsse, wie Temperatur, Luftdruck und Feuchtigkeit können gegenüber dem Labor weitaus extremere Werte annehmen. Auch durch diese Umwelteinflüsse sollte die Genauigkeit des Diagnosesystems wenig beeinflusst werden.

3. Störunterdrückung elektrischer und magnetischer Felder

In einer Hochspannungs-Unterstation wird durch angrenzende, unter Spannung stehenden Sammelschienen Interferenzsignale eingekoppelt, sowohl in die Isolation des Prüfobjektes, als auch in den Messkreis. Die Frequenzanteile des Interferenzsignals sind in der Hauptsache netzsynchron und überlagern sich rein additiv zum Messsignal. Die Intensität des Störsignals ist abhängig von der Sammelschienenspannung und umgekehrt proportional zum Abstand zwischen Prüfobjekt und der spannungsführenden Sammelschiene. In der Vergangenheit war es ausreichend durch Erhöhung der Prüfspannung bis zu 10 kV einen genügend guten „signal to noise" Abstand zu erreichen. Des weiteren konnte durch Polaritätswechsel der Prüfspannung das Interferenzsignal sichtbar und damit kalkulierbar gemacht werden. Doch im Zuge der Einführung der Höchstspannungsebenen bis 500 kV und den immer mehr kompakteren Aufbau der Unterstationen und den damit verbunden geringeren Abständen zwischen spannungsführenden Anlageteilen, sind zusätzliche Massnahmen notwendig geworden den hohen Interferenzstrom zu unterdrücken.

3.1 Störunterdrückung implementiert in einer modifizierten Scheringbrücke

Im Gegensatz zur klassischen Scheringbrücke wurden die Niederspannungszweige durch einen Differentialtransformator ersetzt. Der bekannte rein kapazitive Referenzstrom I_N wird mit entgegengesetzter Polarität in die Messwicklung X derart wieder eingespeist, dass die I_{CX} - Komponente zum grössten Teil kompensiert wird (Bild 1). Übrig bleibt die sehr kleine Komponente I_{RX}, die wiederum verstärkt und dadurch mit guter Auflösung gemessen werden kann. Ausserdem werden in beiden Kanälen, N und X, selektive Filter eingesetzt, um ein reines 50 Hz (60 Hz) Messsignal zu erhalten.

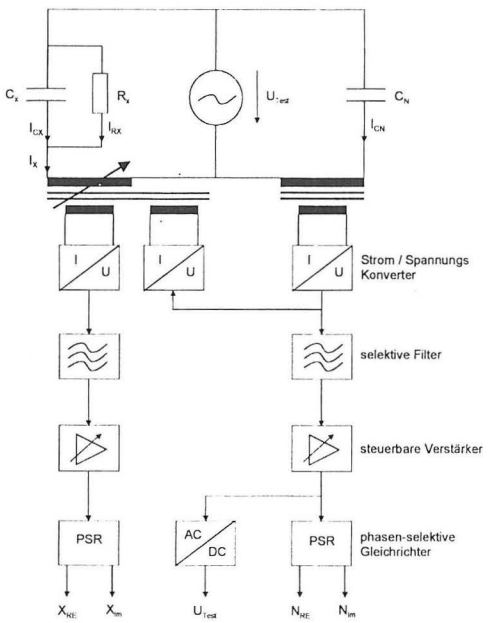


Bild 1: Blockschaltbild „modifizierte" Scheringbrücke

Die Störunterdrückung mittels eines Differentialtransformators teilt sich in zwei direkt aufeinander folgenden, automatisierten Messungen auf [1]. Die erste Messung wird so durchgeführt, dass alle Messleitungen bereits am Prüfling angeschlossen sind, aber die tragbare Spannungsquelle ausgeschaltet bleibt. Das Signal des X-Zweiges wird durch eine Kompensationswicklung gemessen und mit Hilfe des Verstärkers 1 um 180 ° gedreht und wieder eingespeist (Bild 2). Der Verstärker 1 speist genau den Strom ein, der den magnetischen Fluss des Differentialtransformators und damit auch den gemessen Kompensationsstrom $I_{comp.}$ zu Null werden lässt. Der gemessene Strom I_x ist dann $I_x = I_{Interef.} = - I_{comp.}$.
Nachdem nun der Interferenzstrom $I_{Interf.}$ bestimmt wurde, wird die Prüfspannung angelegt und der Ausgang der Kompensationswicklung in Position 2 geschaltet. Da weiterhin permanent der in Messung 1 ermittelte Kompensationsstrom eingespeist wird, kann nun an der Kompensationswicklung der Messtrom I_x

ohne den überlagerten Interferenzstrom $I_{Interf.}$ gemessen werden. Wiederum wird durch einen Verstärker 2 der magnetische Fluss zu Null kompensiert und man erhält den gewünschten Messstrom I_x bzw. dass zu I_x proportionale Spannungssignal U_x. Aus diesem U_x kann der C & tan δ durch einen Vergleich mit dem Signal des Referenzzweiges U_N ermittelt werden.

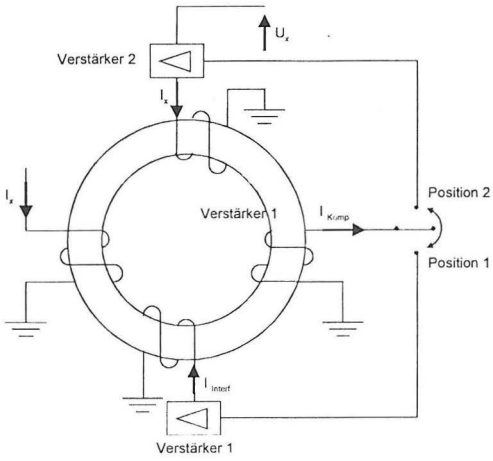


Bild 2: Blockschaltbild Differential Transformator

Der grosse Vorteil der „modifizierten Scheringbrücke" ist die sehr hohe Langzeitstabilität. Das mechanisch definierte Wicklungsverhältnis des Differentialtransformators wird nicht durch thermische Drift oder durch Alterungen der Bauteile beeinflusst. Als internen Referenzzweig wird ein SF_6-isolierter 12 kV Standardkondensator benutzt. Auch dieser ist äusserst Kurz- als auch Langzeit stabil. Periodische Kalibrationen dieses Messsystems sind nur dann notwendig, wenn dies durch Normen oder Vorschriften gefordert wird. Damit ist diese Messbrücke prädestiniert Langzeit – Diagnosemessungen an Prüftransformatoren durchzuführen (Bild 3).



Bild 3:Feldtaugliches Isolationsprüfsystem 2816/5284u

3.2 Störunterdrückung implementiert in einem neu entwickelten, digitalen Diagnosesystems

Die Weiterentwicklung elektrischer Bauelemente, insbesondere der Digitaltechnik, ermöglicht nun das klassische C & tan δ-Messprinzip nach Schering durch eine digitale Vektormetermethode abzulösen. Wesentlicher Vorteil dieser Technik ist eine erhebliche Gewichtsreduktion des Diagnosesystems um bis zu 50 %, eine höhere Flexibilität bei der Datenverarbeitung und eine Vereinfachung in der Messgerätebedienung. Weiterhin ermöglicht diese Technik auch eine weitere Verbesserung der Störunterdrückung durch digitale Datenverarbeitung und geeigneter Wahl der Prüfspannungsform und Prüfspannungsfrequenz. Das neue Diagnosesystem besteht im wesentlichen aus zwei Sensoren, die je am Referenzzweig und am Messzweig ein Spannungssignal abgreifen. Diese Signale werden schon im Sensor digital verarbeitet und mittels eines schnellen Bussystems („Firewire") zum Auswertecomputer geführt. Des weiteren steuert dieser Computer, die im Messsystem integrierte Prüfspannungsquelle (Bild 4).

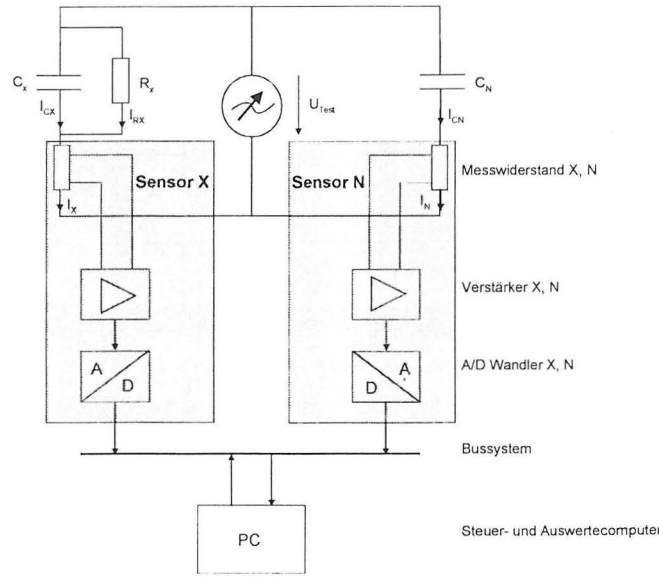


Bild 4: Blockschaltbild eines digitalen Diagnosesystems

Die Prüfspannungsquelle besteht aus einem 2 kVA Leistungsverstärker und einem 15 kV Prüftransformator. Der Leistungsverstärker erlaubt verschiedene Spannungsformen mit Frequenzen von 20 bis 1 kHz zu erzeugen. Dies ermöglicht eine Prüfspannung zu generieren, deren Grundschwingung unterschiedlich der Frequenz des Störsignals ist.

Es wird eine Spannungsform gewählt, die sich aus zwei Grundschwingungen zusammen setzt, die einmal um Δ Hz kleiner und einmal um Δ Hz grösser als die Frequenz des Störsignals bzw. der Netzspannung ist (Bild 5).

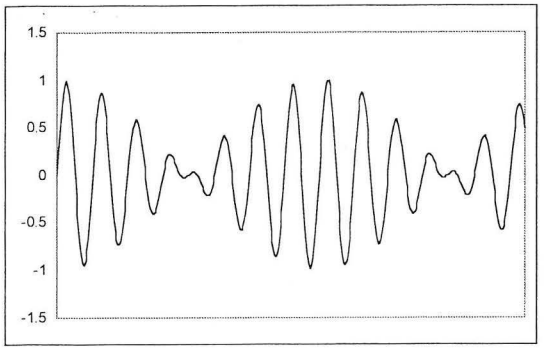


Bild 5: Prüfspannungsform

An den Sensoren X und N wird nun das Signal verstärkt und durch einen Analog-Digital Wandler digitalisiert. Mit einer Fourier Transformation werden die beiden an den Sensoren gemessenen Signale selektiv in den Frequenzbereich transformiert. Der Störvektor wird somit digital herausgefiltert (Bild 6).
Die Phasenverschiebung der beiden Signale wird jeweils für beide Nutzfrequenzen bestimmt und zur Berechnung des tan δ verwendet.

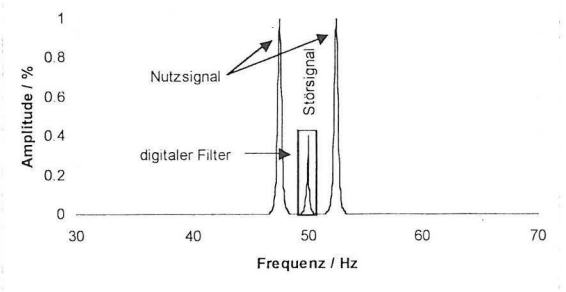


Bild 6: FFT – Analyse Spannungssignal N und X

Gegenüber der herkömmlichen Methode wird der Störvektor kontinuierlich herausgefiltert, sodass auch schnell veränderliche Störsignale die Messung nicht mehr beeinflussen können. Vor jeder Messung werden die beiden Kanäle zeitlich auf einander synchronisiert um einen Drift, hervorgerufen durch Alterung, Temperatur und Bauelementestreuung zu verhindern.

4. Prüfung geerdeter und ungeerdeter Isolationssysteme

Bei Vor-Ort Messungen ist der Prüfaufbau durch die feste Platzierung des Prüfobjektes innerhalb der Unterstation gegeben, insbesondere die Verschaltung der Prüfobjekterde kann nur unter einem nicht vertretbaren Aufwand verändert werden. Darum ist es wichtig, dass für Vor-Ort Messungen der Messkreis so einfach wie möglich aufgebaut werden kann. Dies soll nun an einem Messbeispiel erläutert werden [2] (Bild 7):

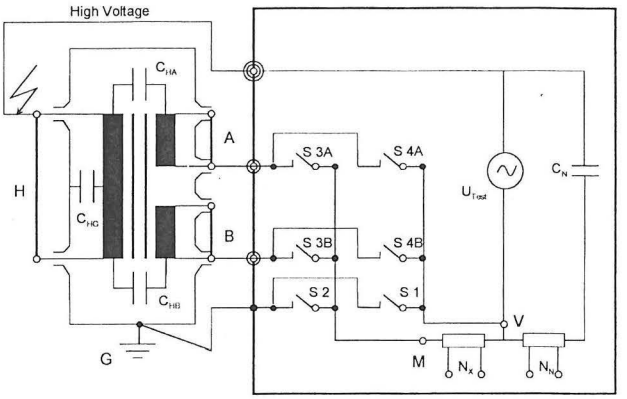


Bild 7: Blockschaltbild Umschalteinheit

Bei einem Transformator werden neben den „ungeerdeten Kapazitäten" (z.B. das Isolationssystem zwischen Primär- und Sekundärwicklung) auch „geerdete Kapazitäten" (z.B. das Isolationssystem zwischen Primärwicklung und geerdetem Kessel) gemessen. Bei einem herkömmlichen Messsystem müsste der äussere Messschaltungsaufbau verändert werden. Dies wird nun durch zwei Messeingänge und einer Umschalteinheit vermieden. Der Transformator wird primär- und sekundärseitig kurzgeschlossen, das Prüfhochspannungskabel wird an der Primärwicklung, die Messkabel A und B an den Sekundärwicklungen angeschlossen. Nun können vollautomatisch ohne jegliche Neuverschaltung, die unterschiedlichen Isolationssysteme des Transformators gemessen werden. Bei geerdeten Kapazitäten wie z.B. C_{HG} wird der Erdpunkt des Transformators G mittels des Schalters S2 mit dem internen Messpunkt M verbunden. Der Schalter S1 bleibt geöffnet. Damit die Kapazitäten C_{HA} und C_{HB} nicht mitgemessen werden, werden diese durch die Schalter S 4A, S 4B auf den Punkt V geschaltet. Damit fliesst der Ladestrom von C_{HA} und C_{HB} nicht durch die Messwiderstände und beinflusst somit nicht mehr die Messung der Kapazität C_{HG}. Sollen ungeerdete Kapazitäten wie z.B. C_{HA} ermittelt werden , wird mittels des Schalters S1 der Erdpunkt G mit dem Punkt V und der Eingang B durch schliessen des Schalters S 3A mit dem Punkt M verbunden. Die Kapazitäten C_{HB} und C_{HG} werden durch schliessen des Schalters S 4B wiederum auf V geschaltet, sodass der Strom durch diese Kapazitäten die Messung von C_{HA} nicht beeinflusst.
Bis zu 7 verschiedene Messvarianten können vollautomatisch durch die Umschalteinheit realisiert werden, ohne dass der Prüfaufbau verändert werden muss.

5. Einfache Handhabung des neu entwickelten Diagnosesystems

Die Qualität einer Diagnosemethode wird neben der natürlich vorausgesetzten Aussagekraft, auch durch die Einfachheit und Effizienz, wie eine Diagnosemessung durchgeführt werden kann, bestimmt. Nur dann, wenn die Investitions- und Betriebskosten eines Diagnosegerätes niedrig gehalten werden können, ist eine einfache Kosten / Nutzen Rechnung durchführbar und deren Anschaffung und Betrieb rentabel. Aus diesem Grunde wurde bei der Neuentwicklung ein Schwerpunkt auf eine einfache Bedienbarkeit des Diagnosegerätes gelegt. Die Bedienungsführung des Gerätes ist in zwei Stufen unterteilt, Daten erfassen und Daten auswerten. Bei der Datenerfassung wird der Anwender gezielt durch die Messung geführt (Bild 7). So wird vor jeder Messung das Anschliessen des Messgerätes an den Prüfling visualisiert und speziell für den jeweiligen Prüfling seine Default – Werte geladen. Durch betätigen des Start Knopf wird nun der vollautomatische Prüfablauf gestartet. Nach Ablauf der Prüfung werden die gemessenen Daten in eine Datenbank abgelegt, bzw. ein Prüfprotokoll wird erstellt. Durch den automatischen Messablauf können Messfehler vor Ort minimiert werden. Mit diesem Bedienkonzept ist gewährleistet, dass zur Durchführung der eigentlichen Messung keine Ingenieurs - Ausbildung notwendig ist und somit die Messungen von der Wartungsmannschaft selbstständig durchgeführt werden kann.

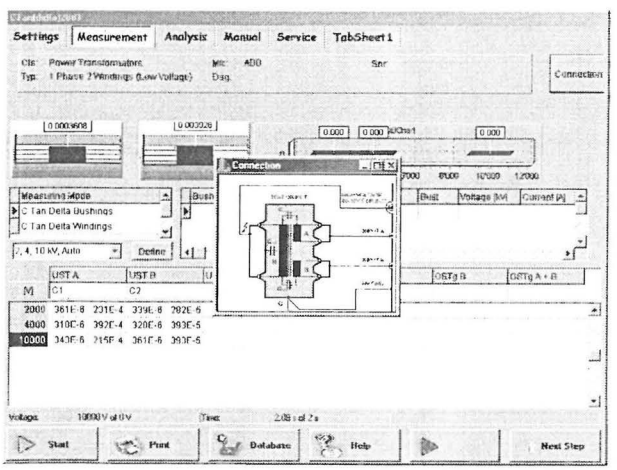


Bild 7: geführte Messwerterfassung mit FITS 6001

Erste Resultate über den dielektrischen Zustand des Isolationssystems erhält der Benutzer durch eine integrierte Auswertesoftware. Diese Software beinhaltet die Möglichkeit Messresultate mit vorherigen Messungen oder mit Messungen an baugleichen Prüflingen zu vergleichen und deren Trendentwicklung zu bewerten. Gesetzte Grenzwerte des tan δ - Wertes ermöglichen dem Benutzer eine Gut (grün) / erhöhte Aufmerksamkeit (gelb) oder Schlecht (rot) Entscheid zu treffen. Eine weitere Bearbeitung der Resultate und deren Archivierung in einer übergeordneten Datenbank kann mittels einer Office Version nach dem Messeinsatz durchgeführt werden.

Die Office Datenbank ist wie die Datenbank des Messgerätes prüflingsorientiert aufgebaut, d.h. Datenform, Default-Daten sind durch den Prüfling vorgegeben und müssen nicht vom Benutzter definiert werden. Die Datensätze können in Relation zu baugleichen Prüflingen, sowie zu älteren Messungen verglichen werden. Für einen Gut- / Schlechtentscheid können in der Officeversion die Grenzen für C & tan δ je Prüflingstyp festgelegt werden. Eine Analyse „Messwerte in Funktion des Alters" erlaubt eine Trenderkennung, die mitentscheidend für die Beurteilung der weiteren Einsatzfähigkeit des Testobjektes ist. Alle Daten sind als CSV Dateien (Comma separated values) verfügbar . So ist eine Integration in eine bereits bestehende Datenbank unproblematisch, bestehende Datensätze können einfach importiert werden.

Neben dem C & tan δ Wert können auch weitere, für den Prüfling relevante Messwerte, wie z.B. Übersetzungsverhältnis und Wicklungswiderstand, in die Datenbank aufgenommen werden. Diese Informationen können zusätzlich zur Beurteilung des Prüflings herangezogen werden.

Dank des niedrigen Gewichtes von 50 kg und der kompakten Bauform kann das Gerät in einen normalen Kombi – PKW transportiert und von einer Person zur Unterstation gebracht werden (Bild 8). Der Touch Screen und das gegen Spritzwasser geschützte Gehäuse erlaubt den Betrieb des Gerätes auch bei widrigen Wetterbedingungen.



Bild 8: Feldtaugliches Isolationsprüfsystem FITS 6001

6. Zusammenfassung

Moderne Diagnosemethoden können einen wesentlichen Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von Hochspannungsisolationssystemen leisten. Grundvoraussetzung ist jedoch, dass die Aussagekraft der Methode nicht durch die Vor-Ort vorzufindenden Bedingungen, wie z.B. Störfelder, Erdungsverhältnisse des Prüflings und klimatische Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Gerade für die Vor-Ort C & tan δ Messung muss ein besonderer Augenmerk auf eine effiziente Störunterdrückung gesetzt werden. Eine neue Störunterdrückungsmethode wurde vorgestellt, die im Gegensatz zur herkömmlichen Methode, auch zeitlich schnell veränderliche Störsignale effizient unterdrücken kann.
Ausserdem sollte ein Diagnosegerät einfach und effizient bedienbar sein, da zum einen die Messmethode über Jahrzehnte hinweg reprodozierbare Messergebnisse liefern muss, und zum anderen die Diagnosemessung aus Kostengründen durch das Wartungspersonal selbst durchgeführt werden sollte. Die Umsetzung dieser Anforderungen wurden anhand eines neu entwickelten Diagnosegerätes gezeigt, wobei vor allem Automation, Bedienführung und der Einsatz einer Datenbank beschrieben wurde.

7. Literatur

[1] R. Malewski, R. Kobi, D.J. Kopacynski, E. Lemke, P. Werelius, „Instruments for HV Insulation Testing in Substations", SC 33 WG 33.03 – 2000

[2] Tettex Application 515d „Dielektrische Messungen an elektrischen Hochspannungsapparaten", Model 2818/5283 Ausgabe 02.96, Dietikon - Schweiz