

Moderne Verfahren zum On-Line TE-Monitoring rotierender Maschinen und Grenzen der Zustandsbewertung

E.Lemke; Th. Strehl
LEMKE DIAGNOSTICS GmbH, Volkersdorf/Dresden

Schlüsselwörter:

Qualitätssicherung, Betriebssicherheit, Teilentladungsmessung, On-line-TE-Monitoring, Früherkennung, Trendbewertung

Kurzfassung:

Diagnostische TE-Messungen an rotierenden Maschinen erlangten in den letzten Jahren eine zunehmende Bedeutung, insbesondere im Rahmen kostenoptimaler Instandhaltungsstrategien, da mit dieser Technik lokale Schwachstellen in der Entwicklungsisolierung rechtzeitig aufgedeckt werden können. Von entscheidendem Einfluss auf die Zustandsbewertung ist die Bereitstellung zuverlässiger Kriterien, da Fehlinterpretationen weitreichende Konsequenzen nach sich ziehen können. Angestrebt wird daher die Messung einer Vielzahl von TE-Kenngrößen und daraus abgeleiteter Parameterkombinationen, um informative TE-Muster für die Trendbewertung zu generieren. Diese hohen Anforderungen können nur durch Verwendung einer leistungsfähigen computer-basierten Messtechnik erfüllt werden. Im Beitrag werden moderne TE-Monitoring Verfahren vorgestellt und neben den Möglichkeiten auch die Grenzen der Zustandsbewertung diskutiert.

1. Einleitung

Übliche Verfahren zur Früherkennung lokaler Schwachstellen in der Isolierung von Hochspannungsanlagen basieren auf der Analyse und Bewertung der elektrischen, akustischen, chemischen und optischen Begleiterscheinungen von Teilentladungen (TE). Die größte Bedeutung erlangte die elektrische TE-Messung, die bereits vor mehr als 30 Jahren standardisiert wurde [1; 2]. Sie ist heute untrennbarer Bestandteil fertigungsbegleitender Qualitätsprüfungen von Hochspannungserzeugnissen und gewinnt auch als Bestandteil einer kostenoptimierten Instandhaltungsstrategie zunehmend an Bedeutung [3-10]. Nachfolgend wird ein Konzept für die permanente TE-Überwachung rotierender elektrischer Maschinen vorgestellt, und es werden Möglichkeiten zur Analyse und Bewertung der komplexen Messdaten aufgezeigt. Außerdem wird auf die Grenzen der Zustandsbewertung, bedingt durch die Signalausbreitung in der Wicklungsisolierung sowie durch die Art der Signalauskopplung, eingegangen.

2. Systemkonzept

Maßgeblich für das Konzept von Monitoring-Systemen ist das Einsatzgebiet. Sollen z.B. nur einzelne hochwertige Anlagen on-line überwacht werden, so ist es aus

Kostengründen zweckmäßig, sämtliche Funktionseinheiten für die Erfassung, Verarbeitung, Analyse und Visualisierung der permanent anfallenden TE-Daten in einer Basis-Einheit zu integrieren. Dagegen ist zur Überwachung zahlreicher gleichartiger Betriebsmittel innerhalb einer Anlage, wie z.B. Generatoren in einem Wasserkraftwerk, der Einsatz von „Sub-Systemen“ (Satelliten) kostengünstiger. Diese erlauben zunächst nur eine dezentrale Vorverarbeitung und Zwischenspeicherung der Messdaten für jede einzelne Maschine, während die Detailanalyse und Zustandsbeurteilung sämtlicher Maschinen erst nach der Datenübertragung zum Server zentral erfolgt. Nachfolgend wird ein praxiserprobtes Systemkonzept vorgestellt, das speziell für die oben genannten spezifischen Einsatzgebiete entwickelt wurde.

2.1 Funktionseinheiten des Basis-Systems

Die Blockstruktur eines Basis-Systems ist aus Bild 1 ersichtlich. In der Verarbeitungseinheit erfolgt die Wahl der Messbereiche (manuell oder Autoranging) und Bandpass-Filterung sowie die analoge Aufbereitung der Eingangssignale. Im Hinblick auf universelle Anwendungen (d.h. außer rotierende Maschinen können auch Sensoren und Koppereinheiten von Transformatoren, Schaltanlagen (GIS) und Energiekabel

überwacht werden) stehen folgende Wechseleinschübe zur Verfügung:

- Breitband-Einschub
für standardisierte TE-Messungen [1; 2],
Bandbreite: 100 - 500 kHz; lineare und
optional logarithmische Bewertung
- Schmalband-Einschub
Resonanzfrequenzen: 200 - 400 - 800 kHz
- RIV-Einschub
Resonanzfrequenz: 1 MHz; Bandbreite 9 kHz
- VHF/UHF – Einschub
max. Messfrequenz 2000 MHz

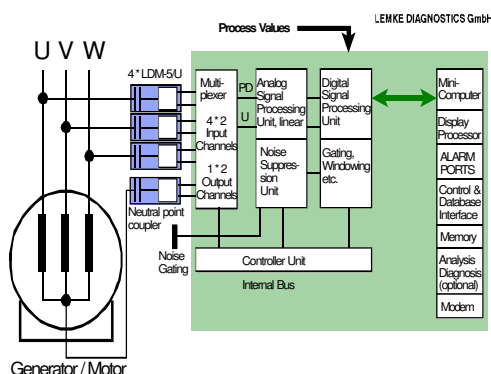


Bild1: Blockstruktur des TE-Monitoring- und Warn-Systems LDWD-6

Die A/D-Wandlung und digitale Signalverarbeitung der Messdaten erfolgt durch einen Signalprozessor. Neben der Visualisierung der flüchtigen TE-Ereignisse erfolgt die simultane Speicherung sämtlicher Daten abhängig vom Ereigniseintritt zwecks späterer Detailanalyse im „Replay-Modus“. Der Messablauf wird durch den implementierten PC über ein intelligentes Softwarekonzept gesteuert und über folgende Benutzer-Schnittstellen aktiviert:

- Systemeinstellung
- Kalibrierung
- TE-Monitoring
- Messdatenanalyse
- Klassifikation / Identifikation

Der PC aktiviert außerdem die Messkanäle im Multiplexer und führt die Eliminierung von Störimpulsen mittels „Gating“ und / oder „Windowing“ durch. Über ein Daten-Interface ist die Vernetzung weiterer Monitoring-Systeme innerhalb der Station (Maschinenhalle) möglich.

Die Datenübertragung zur Leitzentrale erfolgt über Modem oder LAN (Bild 2).

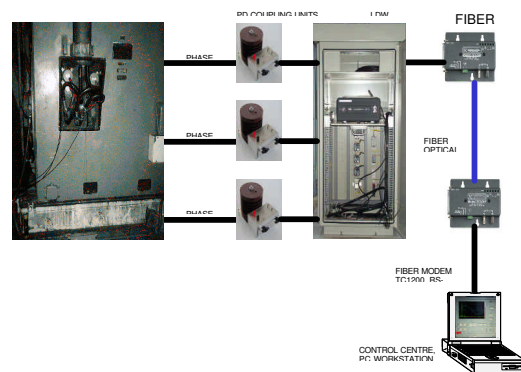


Bild 2: Beispiel für die Vernetzung des TE-Monitoring-Systems LDWD-6

2.2 Funktionseinheiten des Sub-Systems

Die ursprünglich für das Basis-System entwickelte Hard- und Software ist modular strukturiert und wird daher Komponentenweise auch im Sub-System verwendet. Nachfolgend sind einige gerätespezifische Merkmale dieses Systems aufgelistet:

- Eingebetteter RTOS-Computer mit Real-Time-Betriebssystem Linux 2.6 im Satellitenkernel
- FPGA-basierte digitale Signalverarbeitung, bipolar bei 12 bit Auflösung und 50 kHz Impulswiederholrate
- Digitale Filter, die mittels Software konfiguriert werden
- Automatischer Systemcheck nach der ersten Initialisierung sowie zyklische Wiederholung im 24h-Takt
- Schnittstellen:
 - Ethernet-Interface (10/100 Mbps)
 - 4 Eingänge für TE-Impulse mit überlagerten Spannungssignalen
 - 1 Eingang für externe Triggerung bzw. Synchronisation des Messablaufs
 - 1 Eingang zur Störfassung

Zur Identifikation des TE-Datenstromes bei Mehrstellenmessungen (z.B. an sämtlichen Generatoren eines Wasserkraftwerkes) ist jedes Sub-System mit einer IP-Adresse für die Kommunikation mit dem zentralen Datenerfassungs-Server versehen. Auch die Steuerung des Messablaufs und die Konfiguration sämtlicher Einzelgeräte sowie

das Setzen der oben genannten Alarmparameter, wie z.B. TE-Pegel, Impulswiederholrate und Dauer der Ereignisse, erfolgt vom zentralen Server an die jeweilige IP-Adresse.

Sämtliche Messdaten werden auf dem lokalen Server in einer Datenbank mit automatischer Datenreduktion verwaltet. Hier erfolgt auch die automatisierte Analyse der Messdaten unter Berücksichtigung des jeweiligen Betriebszustandes der Generatoren sowie die Selektion repräsentativer Datensätze zur Langzeitspeicherung für eine spätere Detailanalyse. Nach dem Datentransfer auf eine zentrale Diagnosedatenbank ist schließlich eine Detailanalyse und Zustandsbewertung unter Beachtung der relevanten Generatorbetriebsdaten möglich.

Aufgrund des kompakten und stabilen Designs des Sub-Systems (Bild 3), des geringen Gewichtes von nur 5,5 kg und der geringen Leistung von maximal 25 W kann die Installation direkt am Diagnoseobjekt erfolgen. Der Schutzgrad IP 65 erlaubt einen Betrieb in üblicher Industrieumgebung sowie eine Wandmontage in jeder Position. Als Beispiel zeigt Bild 4 das Prinzip des permanenten TE-Monitorings von 3 Generatoren. Dabei werden die TE- und Spannungssignale für jeden Generator über 4 Kanäle (3 Phasen und Sternpunkt) erfasst und bewertet.



Bild 3: Ansicht des Sub-Systems LDWD-7

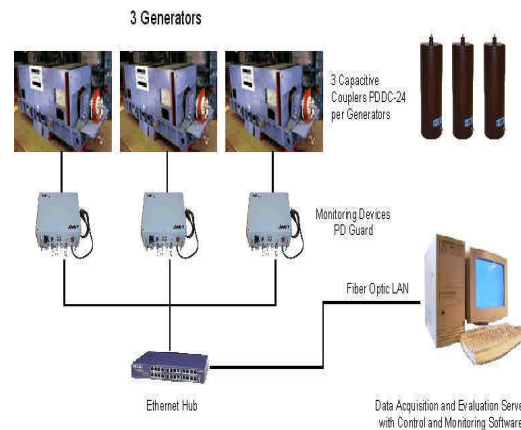


Bild 4: Prinzip des permanenten TE-Monitorings von 3 Generatoren mit dezentral installierter Gerätetechnik

3. Moderne Verfahren für die TE-Diagnose und Zustandsbewertung

Wesentlichstes Ziel diagnostischer TE-Messungen an rotierenden Maschinen ist die Bereitstellung aussagefähiger Kriterien für die Zustandsbeurteilung der Wicklungsisololation. Um Fehlinterpretationen beim „TE-Befund“ auszuschließen, müssen möglichst zahlreiche TE-Kennwerte und daraus abgeleitete Parameterkombinationen erfasst, analysiert und bewertet werden. Grundvoraussetzung dafür ist ein äußerst leistungsfähiges Hard- und Softwarekonzept.

Die Strategie der computer-gestützten TE-Messung basiert üblicherweise auf der Erfassung der Ausgangsparameter „TE-Impulse“ und „Prüfspannung“ zugeordnet zur Phasenlage (Bild 5). Dadurch können sämtliche in den relevanten Standards [1; 2] genormte fundamentale TE-Kenngrößen gemessen und daraus auch zwei- und dreidimensionale Parameterkombinationen generiert werden (Bild 6).

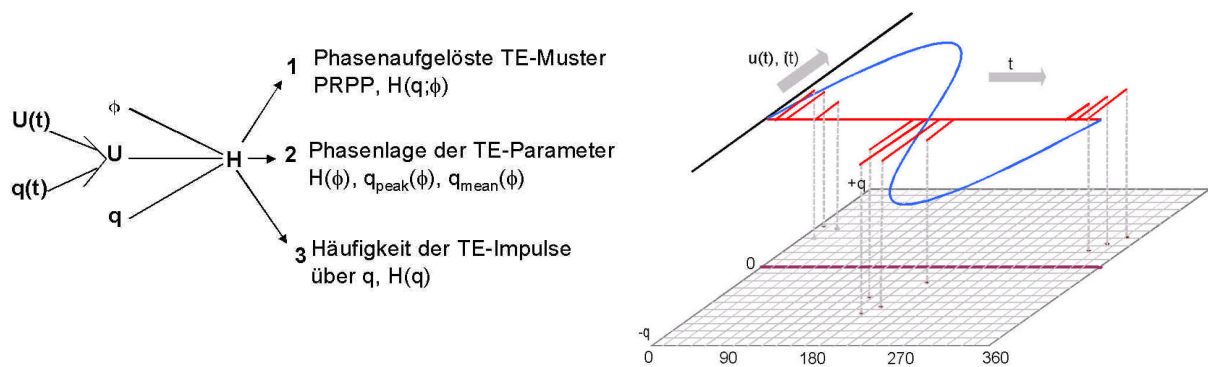


Bild 5: Strategie der TE-Signalverarbeitung

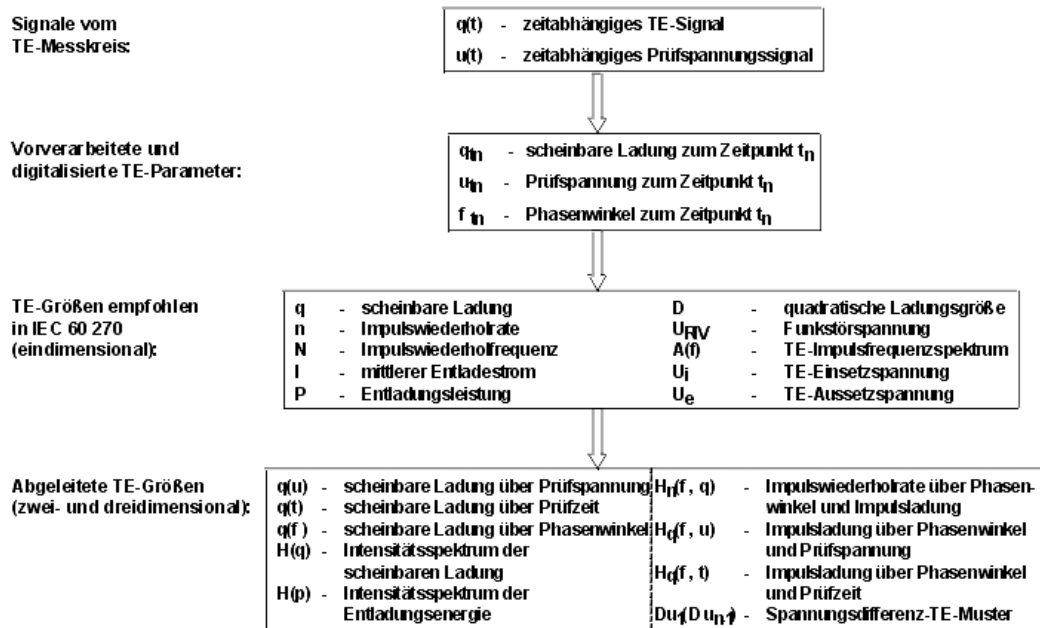


Bild 6: Übersicht über die in [1; 2] standardisierten TE-Kennwerte und daraus abgeleitete zwei- und drei- dimensionale Parameterkombinationen

Da bei der TE-Überwachung rotierender Maschinen primär das Ziel verfolgt wird, signifikante Abweichungen vom „Normalzustand“ rechtzeitig zu erkennen, müssen informative Zustands- und Trendparameter zunächst im Rahmen einer Anfangsdiagnose bei der Inbetriebnahme definiert werden, um das Überwachungssystem für den automatisierten Betrieb zu konfigurieren.

Da zur Trendbewertung zwei- und dreidimensionale TE-Muster besonders vorteilhaft sind, verfügen beide hier vorgestellten Systeme über spezielle Softwarefeatures zur Auswertung solcher Muster im „Replay-Modus“ (Bild 7).

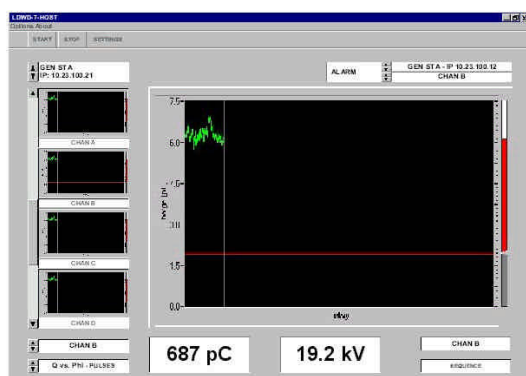
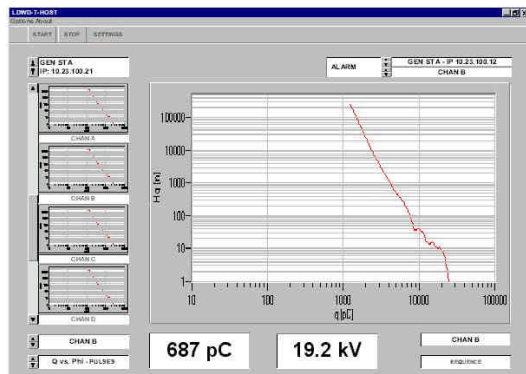
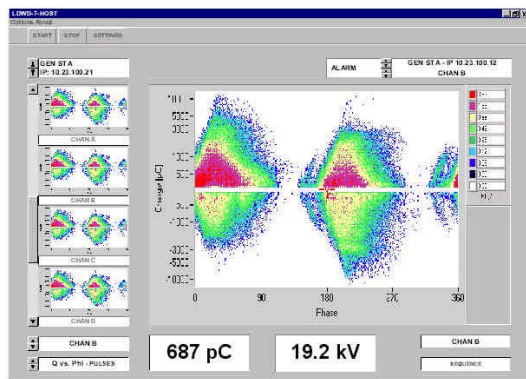


Bild 7: Beispiele für die Generierung von TE-Übersichtsbildern im „Replay-Modus“

Durch diese Betriebsart können letztlich moderne Methoden der Merkmalsextraktion für die Mustererkennung und Generierung von Referenzdatenbanken effizienter gestaltet werden. Daher erfolgt die Trendbewertung auf der Basis von TE-Mustern zunehmend mittels moderner Verfahren der Korrelationstechnik [10; 11].

Neben der Trendbewertung ist es außerdem zweckmäßig, bei einer kritischen Verschlechterung des Isolationszustandes ein Warn- oder Alarmsignal auszulösen. Das hier vorgestellte Systemkonzept verfügt über solche speziellen Features. Um Fehlalarmen durch Störbeeinflussungen zu vermeiden, basiert das Alarmkriterium auf

einer Kombination charakteristischer TE-Parameter, wie z.B.:

1. Maximalwert der Impulsladung
2. Anzahl der TE-Impuls-Sequenzen pro Periodendauer, die den unter Pkt.1. vorgegebenen Schwellwert überschreiten
3. Zeitdauer, innerhalb der die unter Pkt. 1. und 2. vorgegebenen Randbedingungen permanent erfüllt sind

Die Einstellung der Schwellwerte für diese Parameterkombination erfolgt auf der Basis von Betriebserfahrungen. Nach der Initialisierung des Monitoring-Systems wird üblicherweise der zeitabhängige TE-Pegel registriert und permanent in mehrfach gepufferten „History-Files“ abgelegt. Erst im Falle einer kritischen Trendentwicklung, die durch die Überschreitung der voreingestellten Schwellwerte definiert ist, wird zeitgleich mit der Alarmauslösung die klassische Aufzeichnung des TE-Pegels durch die Visualisierung und Abspeicherung phasen- aufgelöster TE-Muster abgelöst.

Von besonderem Vorteil ist dabei der bereits oben erwähnte „Replay-Modus“, so dass die Analyse durch Experten nicht simultan zu den flüchtig anfallenden „Rohdaten“ erfolgen muss, sondern auch zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden kann.

4. Grenzen der Zustandsbewertung

Die Ergebnisse diagnostischer TE-Messungen an rotierenden elektrischen Maschinen dienen zunehmend als Entscheidungskriterium mit weitreichenden ökonomischen Konsequenzen, so dass eine möglichst hohe „Diagnoseschärfe“ angestrebt werden muss. Bezüglich einer zuverlässigen Beurteilung der TE-Aktivität im gesamten Wicklungssystem ergeben sich jedoch physikalisch und messtechnisch bedingte Grenzen. So werden die hochfrequenten Anteile im TE-Impulsspektrum bei ihrer Ausbreitung längs der Maschinenwicklung aufgrund der Dispersion zunehmend gedämpft. Folglich erfassen nichtkonventionelle Koppler, wie z.B. kapazitive und induktive Sensoren, Slotkoppler sowie Richtkoppler [4], nur sehr hochfrequente Anteile von meist über 10 MHz. Daher können TE-Quellen nur in unmittelbarer Nähe der Koppelstelle detektiert werden. Vorteilhafter ist dagegen die Anwendung der standardisierten Signalauskopplung [1; 2]. Unter diesen Bedingungen sind noch Frequenzanteile von

deutlich unter 500 kHz messbar, so dass damit auch die „Reichweite“ für detektierbare TE-Quellen in der Wicklung wesentlich erhöht wird [7]. Von Vorteil ist außerdem, dass bei Verwendung der Standard-Kopplung die TE-Kenngröße „scheinbare Ladung“ gemessen werden kann. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, die Ergebnisse von Vor-Ort-Messungen mit wissensbasierten Referenzdaten, die im Laufe von Jahrzehnten unter Laborbedingungen ermittelt wurden, zu vergleichen und somit für die Identifikation und Klassifizierung von TE-Fehlern nutzbar zu machen.

Den oben genannten Vorteilen des standardisierten Messverfahrens steht allerdings der Nachteil gegenüber, dass durch die Begrenzung der Messfrequenz auf unter 500 kHz [1; 2], die elektromagnetischen Störeinflüsse im niederfrequenten Bereich stärker ausgeprägt sind. Um dadurch bedingte Fehldiagnosen auszuschließen, wurden zahlreiche Verfahren zur Eliminierung von Störungen entwickelt. Genutzt wird dazu meist das automatische „Gating“ oder, im Falle von phasensynchronen Störern, das „Windowing“.

Auch die hier vorgestellten Systeme verfügen über diese Features, wobei neben der üblichen analogen Störausblendung auch ein digitales Verfahren anwendbar ist. Beim Gating werden speziell dimensionierte Feldsensoren (Antennen) zum Empfang der Störimpulse genutzt. Diese sperren bei Überschreiten eines vorgewählten Schwellwertes einer Gating-Einheit digital den Signaldurchlauf in der TE-Verarbeitungsstufe für die Dauer des Störimpulses automatisch. Die digitale Ausblendung von Störimpulsen wird durch „Windowing“ in der Betriebsart „Replay-Mode“ realisiert. Dazu erfolgt zunächst die manuelle Eingrenzung des störenden Impulsmusters mittels Cursor und anschließend die Ausblendung des ausgewählten Fensters.

Bild 8 zeigt beispielhaft die Ausblendung von Erregerimpulsen eines Hydrogenerators. Erst dadurch konnte nachgewiesen werden, dass der hohe Messpegel nicht durch TE in der Wicklungsisolation verursacht wurde, sondern auf eine als gefährlich eingestufte TE-Quelle außerhalb der Maschine zurückzuführen war.

Weitere Grenzen der Zustandsbewertung resultieren aus der Existenz zahlreicher TE-Quellen mit unterschiedlicher Charakteristik.

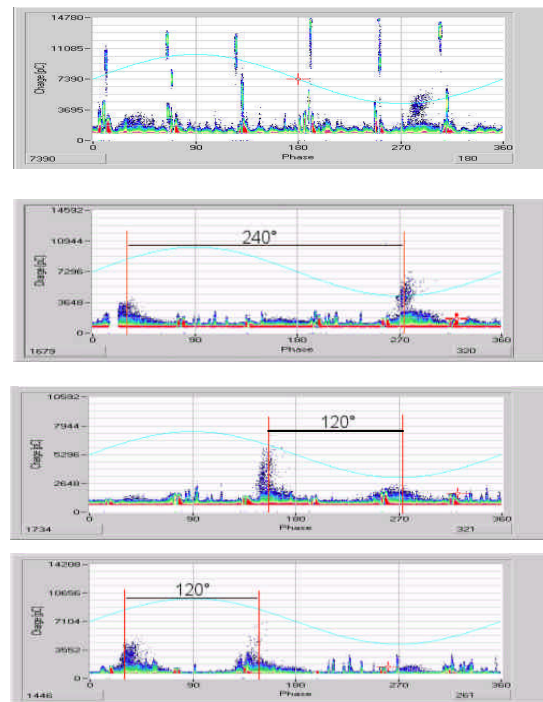


Bild 8: Beispiel für die digitale Eliminierung von Störimpulsen

Der gemessene TE-Pegel korreliert dabei keineswegs immer mit dem Ausmaß der Schädigung der Wicklungsisolation. So ist beispielsweise das Gefährdungspotential von Oberflächenentladungen am Wickelkopf der Maschine weit geringer als das von Hohlraumentladungen im Aktivteil, obwohl im ersten Falle der TE-Pegel einige 10 nC erreichen kann, während im zuletzt genannten Fall nur wenige nC gemessen werden. Hinzu kommt, dass die Distanz zwischen den verschiedenen TE-Quellen und der Auskoppelstelle an den Klemmen der Maschine stark differiert. Auch diese Tatsache unterstreicht, dass der Absolutwert der „scheinbaren Ladung“ kein geeignetes Diagnosekriterium sein kann. Wesentlich informativer sind dagegen Trendbewertungen auf der Basis charakteristischer TE-Muster. Daher wird derzeit verstärkt an der Entwicklung von Softwaretools gearbeitet, die in der Lage sind, typische TE-Muster unterschiedlicher Fehlstellen durch Verfahren der Korrelationstechnik zu separieren [11; 12].

Auch das hier vorgestellte Systemkonzept verfügt über solche Möglichkeiten zur Identifizierung verschiedener TE-Quellen durch eine „Spannungs-Differenz-Analyse“ [12], wie in Bild 9 beispielhaft dargestellt.

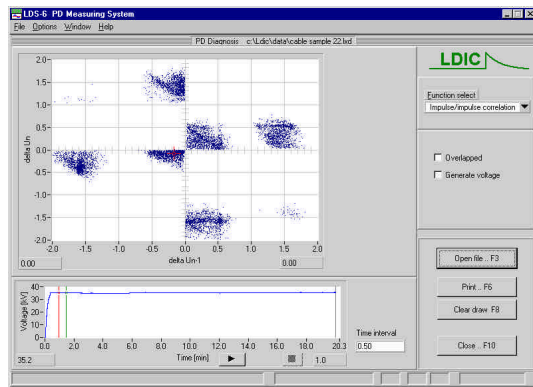


Bild 9: ΔU -Pattern eines Maschinenstabes, ermittelt im „Replay-Modus“

Erwähnt sei schließlich noch, dass auch eine möglichst breitbandige Erfassung und Darstellung der TE-Impulse, die optional ebenfalls im vorgestellten Systemkonzept implementiert werden kann, äußerst hilfreich für eine Identifizierung und auch Ortung verschiedener TE-Quellen sein kann. Durch die breitbandige Messmethode ist es aufgrund von Laufzeitmessungen und durch eine Bewertung der Impulsform relativ einfach möglich, Entladungen innerhalb und außerhalb der Maschine zu separieren.

4. Schlussfolgerungen

1. Die permanente (on-line) Zustandsdiagnose der Wicklungsisolation großer elektrischer Maschinen erlangt als Bestandteil kostenoptimaler Instandhaltungsstrategien zunehmend an Bedeutung.
2. Die Auswahl der dazu erforderlichen Messtechnik hat nicht nur einen entscheidenden Einfluß auf die Effizienz des Diagnoseverfahrens, sondern auch auf die Zuverlässigkeit der überwachten Betriebsmittel.
3. Erst durch Fortschritte auf den Gebieten der Mikroelektronik sowie der Informations- und Kommunikationstechnik war die Entwicklung einer leistungsfähigen Diagnosetechnik möglich, die allen Ansprüchen bezüglich des On-Line-TE-Monitorings rotierender elektrischer Maschinen gerecht wird.
4. Da Entscheidungen auf der Basis des „TE-Befundes“ von weitreichenden ökonomischen Konsequenzen sein können,

sind durch das TE-Monitoring informative Kriterien für eine zuverlässige Bewertung des Isolationszustandes bereit zu stellen. Voraussetzung dafür ist die Erfassung einer Vielzahl von TE-Kenngrößen und daraus abgeleiteter Parameterkombinationen.

5. Grenzen in der Bewertung des Zustandes der Wicklungsisolation resultieren in erster Linie aus der Dispersion und aus der Verformung von TE-Impulsen bei der Ausbreitung im Wicklungssystem. Daher ist die Erfassung des „niederfrequenten“ Spektrums möglichst unterhalb von 500 kHz anzustreben. Diese Forderung kann vorzugsweise durch die standardisierte TE-Signalauskopplung erfüllt werden.
6. Nichtkonventionelle kapazitive Koppler und Slotkoppler sind aufgrund ihres Hochpass-Verhaltens nicht für eine Identifizierung von TE-Fehlstellen in der kompletten Wicklungsisolation geeignet. Sie erlauben lediglich eine Signalerfassung in der Umgebung des Installationsortes. Ihr Übertragungsverhalten bestimmt im wesentlichen die Form und Amplitude des erfaßten Signals.
7. Das Ausfallrisiko hängt maßgeblich von der jeweiligen TE-Fehlstellenart in der Maschinenisolierung ab. Zu beachten ist dabei, dass sich das charakteristische TE-Muster bei Laständerungen ebenfalls verändern kann.
8. Eine Absolutbewertung der standardisierten TE-Kenngröße „scheinbare Ladung“ ist aufgrund der Dispersion von TE-Impulsen sowie durch die unterschiedliche Charakteristik verschiedener Fehlstellenarten für eine Risikoabschätzung nicht geeignet. Wesentlich informativer ist die Bewertung von Trendentwicklungen (Trending) auf der Basis komplexer TE-Muster.

Literatur

- [1] *Partial discharge measurements. IEC 60 270 (2001)*
- [2] *Hochspannungs-Prüftechnik; Teilentladungsmessungen. DIN EN 60270 (2001)*

- [3] R. Pietsch, L. Gutfleisch, L. Niemeyer: *Sequential Partial Discharge Pattern Analysis as a diagnostic tool for PD-monitoring in HV systems. Nordic Insulation Symposium Bergen (1996)*
- [4] G.C. Stone: *Partial discharge signal measurements to assess rotating machine insulation condition: A survey. Int. Symp. On El. Ins. Montreal (1996)*
- [5] T. Leibfried: *Monitoring von Leistungstransformatoren - Jetzt auch für kleine und mittlere Baugrößen. Elektrizitätswirtschaft 98 (1999) 20*
- [6] P.Boss, P. Lorin, A. Viscardi, J.W. Harley, J. Iseke: *Economical aspects and practical experiences of power transformer on-line monitoring. CIGRE Session Paris (2000) 12-202*
- [7] E. Binder, A. Draxler, H. Egger, A. Hummer, H.R. Fuchs, H. Koklek, F. Müller, M. Drpic, M. Hof, R. Käfer, S. Lanz: *Entwicklungen und Nachweisuntersuchungen von Diagnosemethoden für Wasserkraftgeneratoren. E&I 117 (2000) 12*
- [8] M. Hoof, T. Laird, C.A. Marsh: *Real-time assessments condition trending of generators utilizing continuous partial discharge monitoring. EPRI-Utility Generator Predictive Maintenance and refurbishment. New Orleans, LA (2001)*
- [9] T. Strehl, E. Lemke, H. Elze: *On-line PD measurement, diagnostic tools and monitoring strategy for generators and power transformers. 12th ISH Bangalore (2001)*
- [10] M. Hoof: *TE-On-Line-Monitoring an rotierenden Maschinen, Moderne Verfahren, Möglichkeiten und Grenzen der Zustandsbewertung. HIGHVOLT KOLLOQUIUM (2003) 225-232*
- [11] M. Hoof; C.E. Stephan: *Moderne Diagnoseverfahren zur Beurteilung der Wicklungsisolations elektrischer Maschinen. 46th Int. wiss. Kolloquium TU Ilmenau (2001)*
- [12] C. Hudon, M. Belec, A. Contin, A. Cavalini, D.N. Nguyen, G.C. Montanari, M.Conti: *Evolution in automatic phase resolved partial discharge pattern recognition for machine diagnosis. 13th ISH Delft (2003) O.14.06*

Kontaktadresse:

LEMKE DIAGNOSTICS GmbH
 Radeburger Str. 47
 01468 Volkersdorf / Dresden
www.ldic.de