

Jürgen Weidner

1. Einleitung

Kraftwerke gehören zu den kapitalintensiven Industrieanlagen, deren unvorhergesehener Ausfall für den Betreiber zu hohen finanziellen Einbußen führen kann. Um die Ausfall- und Revisionszeiten möglichst kurz zu halten und dadurch eine hohe Verfügbarkeit der Anlage zu erzielen, ist eine genaue Kenntnis ihres Zustandes erforderlich. Von besonderer Bedeutung ist dabei eine möglichst frühzeitige Anzeige sich anbahnender Schäden mit Hilfe empfindlicher Überwachungssysteme (On-Line Monitoring).

Fehler in Hochspannungsbetriebsmitteln deuten sich häufig durch elektrische Entladungen oder Funkenbildung an, bevor es zu schwerwiegenden Kurzschlüssen kommt. Diese kurzzeitigen Stromimpulse haben ein breitbandiges Frequenzspektrum, das mit Hochfrequenzmeßverfahren erfaßt und ausgewertet werden kann. Auf diesem Prinzip beruhen die Radio Frequency (RF)- Monitoring Systeme zur Überwachung von Generatoren, Transformatoren und gasisolierten Schaltanlagen während des Betriebes.

Für die Überwachung von Generatoren sind recht unterschiedliche HF-Meßverfahren entwickelt worden. Sie unterscheiden sich einerseits in der Art der Ankopplung, über die die hochfrequenten Impulse aus dem Generator empfangen werden, und zum anderen auch im Verfahren der Signalverarbeitung und Darstellung.

Von Kurtz et. al. /1/ wird eine auf dem Generatorläufer mitrotierende Antenne beschrieben, die die Hochfrequenzfelder der Entladungen in den einzelnen Ständernuten erfaßt und auf diese Weise sogar eine Ortung ermöglichen soll. Bei Wasserkraftmaschinen ist im Bereich des Ständerwickelkopfes genügend Platz, um eine direkte kapazitive Ankopplung zu installieren. Kurtz und Lyles /2/ verwenden hierzu kurze Stücke von Hochspannungskabeln als Koppelkondensator.

An Turbogeneratoren, deren Sternpunkt über eine Drossel oder einen Widerstand geerdet ist, kann - wie Emery et. al /3/ ausführen - in diese Erdverbindung ein HF-Stromwandler zur Signalauskopplung gelegt werden.

Davey /4/ hat Messungen nach diesem Verfahren durchgeführt. Alternativ hierzu wird von Emery und Harrold /5/ auch eine kapazitive Ankopplung parallel zur Sternpunktdrossel angegeben, wodurch die Meßempfindlichkeit verbessert wird.

Die angewandten Meßverfahren können unterteilt werden in schmalbandige Systeme, die entweder mit einer Festfrequenz arbeiten (Emery et al. /3/) oder einen ausgewählten Frequenzbereich selektiv durchwobbeln (Timperley /6/), und in breitbandige Meßsysteme. Von Malik et. al. /7/ wird ein Breitbanddetektor beschrieben, der über Antennenkopplung sogar bis in den Bereich von 1 GHz Störspannungen empfängt und deren HF-Energie anzeigt.

Für die Messungen an Wasserkraftgeneratoren wurde in Kanada von Stone /8/ ein breitbandiger Impulshöhenanalysator entwickelt. Aus charakteristischen Werten der Impulshöhen und Häufigkeiten schließt der Autor auf bestimmte Fehler in der Generatorwicklung.

Der Vorteil eines breitbandigen Überwachungssystems besteht darin, daß es oszillografische Impulsdarstellungen im Zeitbereich erlaubt. Wie Wichmann et. al. /9/ zeigen, können aus Phasenlage, Amplitude und Häufigkeit der Impulssignale wichtige Informationen über die Ursache und den Entstehungsort gewonnen werden. Zudem bietet eine Frequenzanalyse (FFT) die Möglichkeit, sinusförmige Störgrößen durch adaptive Filter zu unterdrücken (König und Feser /10/) und so die Meßempfindlichkeit zu steigern.

2. Ein breitbandiges HF-Überwachungssystem für Kraftwerke

Die im folgenden beschriebene Überwachungseinrichtung koppelt die HF-Signale über mehrere Ankopplungspunkte im elektrischen System des Kraftwerkes aus. Vorzugsweise werden dazu die Netzschutzkondensatoren in den drei Generatorableitungen sowie das isoliert aufgebaute Erregerlager genutzt (Bild 1). Damit ist der Generator über die Läuferwelle und die drei Phasenanschlüsse meßtechnisch beidseitig erfaßt. Durch Ankopplung an die kapazitive Durchführungsteuerung auf der Hochspannungsseite können auch die Maschinentransformatoren entsprechend überwacht werden. Weitere Meßpunkte in oder an den elektrischen Kraftwerkskomponenten – insbesondere im Eigenbedarf – sind möglich und teilweise schon erprobt oder realisiert. Eine derartige "einkreisende" Auskopplung von HF-Störsignalen erleichtert naturgemäß die Ortung der Ursache in den betroffenen elektrischen Betriebsmitteln.

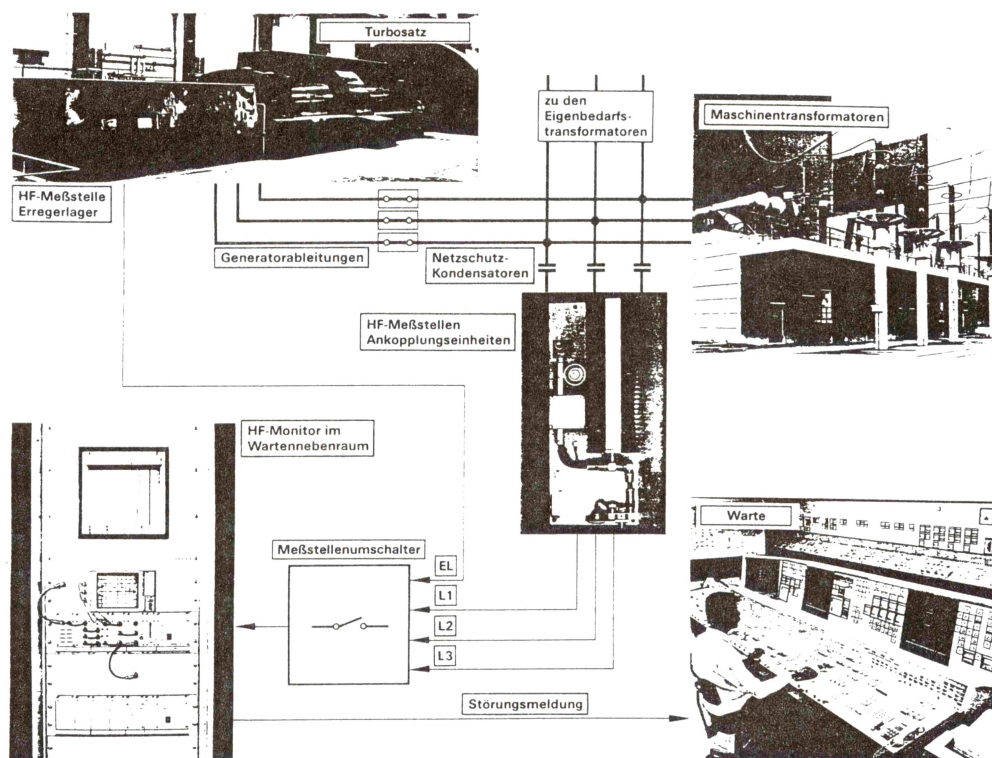


Bild 1: Einbindung der HF-Störspannungs-Überwachung in die Kraftwerkanlage

2.1 Ankopplung über Kondensatoren an den Generatorableitungen

Die in der Nähe der Maschinentransformatoren an den Ableitungen gegen Erde installierten Netzschutzkondensatoren liefern einen hervorragenden Rückschluß für hochfrequente Signale. Sie können im Sinne der Teilentladungsmeßtechnik als Koppelkondensatoren aufgefaßt werden, an deren erdseitigen Anschlüssen lediglich Ankopplungsimpedanzen einzufügen sind. Eine hochfrequenzmäßige Ankopplung über einen Unterwiderstand an dieser Stelle eröffnet die Möglichkeit einer Überwachung nicht nur des Generators, sondern des gesamten Ableitungsbereiches einschließlich der Maschinen- und Eigenbedarfs- transformatoren (Bild 1). Diese Art der Erfassung des Meßsignales zeichnet sich außerdem durch folgende Merkmale aus:

- Durch die kapazitive Kopplung mit ihrer RC-Hochpaßcharakteristik ist eine gute Meßempfindlichkeit für die zu erwartenden hochfrequenten Stromimpulse gegeben.

- . Einfache Ausführung ohne aktive elektronische Bauteile innerhalb des Hochspannungsbereiches.
- . Möglichkeit einer Lokalisierung der Störspannungsquelle durch direkten Signalvergleich zwischen den drei Leitern während des Betriebes.
- . Möglichkeit der Impulszuordnung zur Phasenlage der Netzfrequenz bei breitbandiger Messung.

Bild 2 zeigt ein Einbaubeispiel einer Ankopplungseinheit in einem niederländischen Kraftwerk.

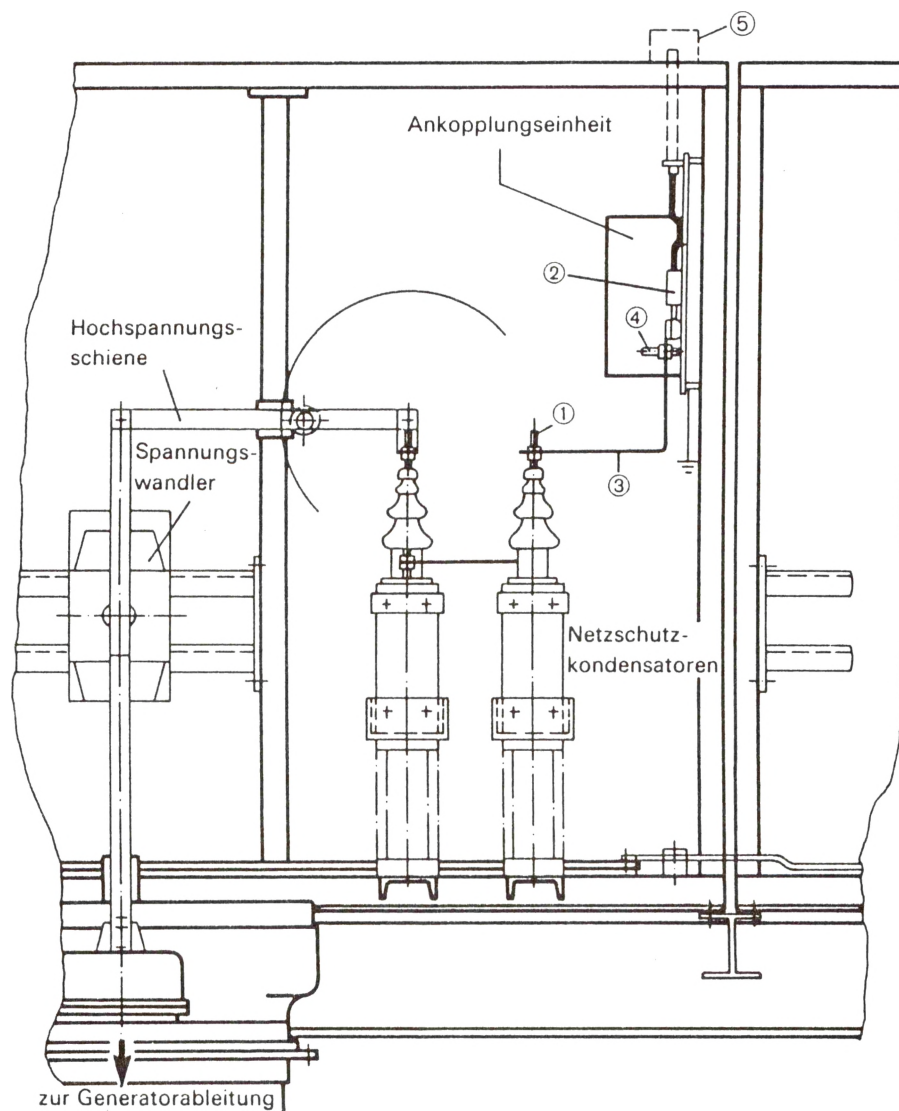


Bild 2: Einbaubeispiel einer Ankopplungseinheit in der Hochspannungszelle oberhalb der gekapselten Generatorableitung im Maschinenhaus eines 770-MVA-Blockes

2.2 Funktionsweise des HF-Monitors

Der HF-Monitor arbeitet im Frequenzbereich von 30 kHz bis 10 MHz mit über 40 dB Dynamik. Die Phasenlage, Amplitude und Häufigkeit der hochfrequenten Impulse wird auf einem Oszilloskop dargestellt. Der Signalpegel der einzelnen Meßstellen wird auf einem Mehrkanalschreiber aufgezeichnet. Es werden die größten Einzelimpulse erfaßt und anschließend der geometrische Mittelwert über einen einstellbaren Zeitbereich gebildet, um ungewollte Signalstreuungen zu reduzieren. Über eine Fensterschaltung lassen sich phasenfeste Störimpulse ausblenden. Die Überschreitung eines vorwählbaren Alarmpegels löst eine Meldung auf dem Leitreechner in der Kraftwerkswarte aus.

Durch konsequente Modulbauweise sind die einzelnen Baugruppen austauschbar. Auf diese Weise kann der HF-Monitor besonderen kraftwerkspezifischen Gegebenheiten leicht angepaßt werden. Dies betrifft insbesondere die Dimensionierung der Filter und die Anzahl der zu überwachenden Meßstellen. Weiterentwicklungen und ein Ausbau des Überwachungskonzepts lassen sich mit geringem Aufwand durch neue Module nachrüsten.

2.2 Basismessungen zur Störgrößenerfassung

Um einen Vergleich der HF-Störgrößen zu erlangen, die in verschiedenen Kraftwerken gemessen werden, ist nach der Installation der HF-Überwachung eine Kalibrierung notwendig. Dazu wird im Stillstand des Blocks bei geschlossenem Generatorschalter und offener Oberspannungsseite der Maschinentransformatoren an jedem Meßpunkt ein Impuls definierter Ladung eingespeist und am HF-Monitor registriert.

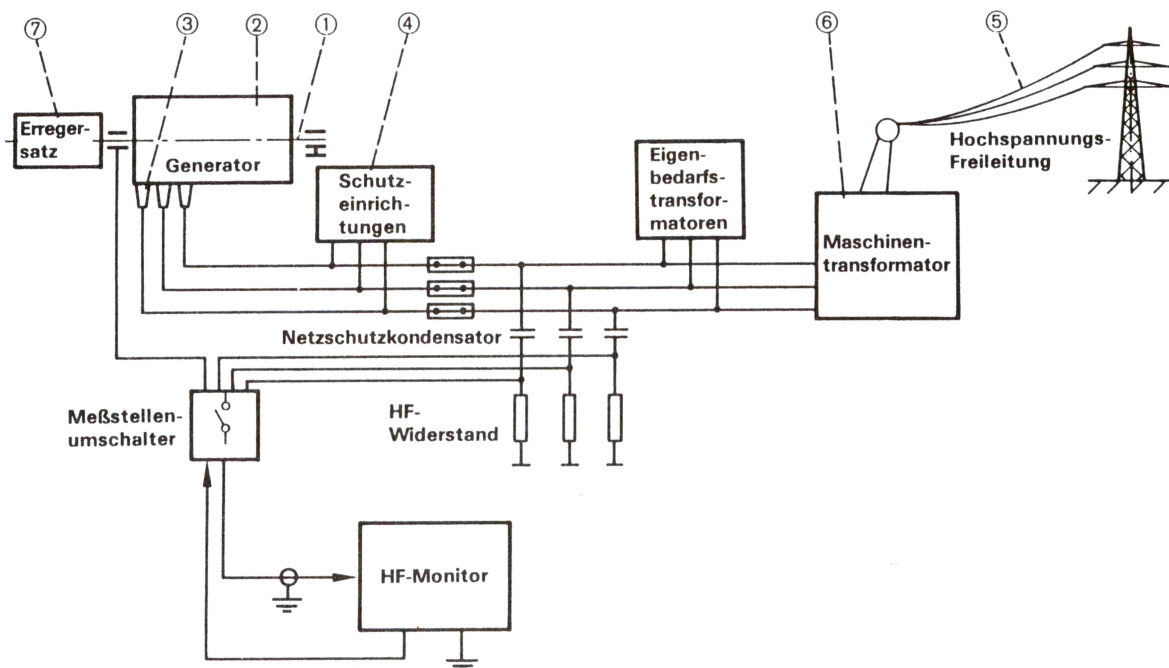
Vor der Synchronisation des Generators wird der über die Maschinentransformatoren und den Eigenbedarf eingestreute Grundstörpegel als Referenzwert aufgezeichnet und analysiert. Im Anschluß an die Synchronisation werden zwei weitere Basismessungen bei schwacher Generatorlast sowie bei Vollast durchgeführt. Die Dokumentation dieser sog. Nullmessungen liefert den Bezug für spätere Folgemessungen und die Grundlage für die kontinuierliche HF-Überwachung.

3. Beispiele erkannter Fehler und Störungen

Durch den weltweiten Einbau von Ankopplungseinheiten in über 40 Kraftwerks-

blöcken mit Leistungen von 160 bis 1640 MVA sind an diesen Einheiten die Voraussetzungen für eine kontinuierliche HF-Überwachung gegeben. In 11 Blöcken ist bereits ein kompletter HF-Monitor installiert. In den zur Zeit noch nicht mit einem HF-Monitor ausgestatteten Kraftwerken werden in regelmäßigen Zeitabständen Kontrollmessungen ausgeführt.

Die in Bild 3 aufgeführten und markierten Fehler zeigen, daß die HF-Überwachung durch die empfindliche Kopplung an den Generatorableitungen einen weiten Bereich zu erfassen vermag. Nachfolgend wird das charakteristische Erscheinungsbild einiger dieser Fehler, so, wie es sich in der HF-Meßtechnik bietet, dargestellt.



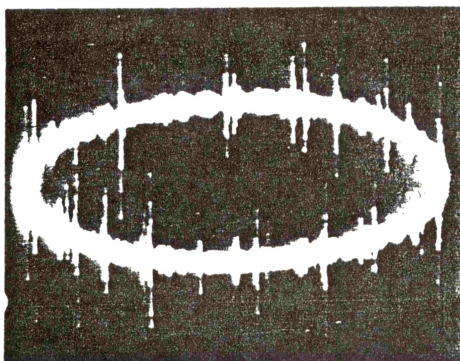
1. Bürstenfeuer an den Wellenerdungsbürsten
2. Abriß einer Erdverbindung an einer Generatorschaltleitung
3. Defekter Steuerbelag in einer Generator-Stromführung
4. Leiterunterbrechung in der Wicklung eines gießharzisierten Stromwandlers für Generatorschutz
5. Starke äußere Teilentladung (Korona) an einem 400-kV-Erdungstrennschalter
6. Hochspannungsentladungen in einem Maschinen-transformator 850 MVA, 27 kV/400 kV
7. Schlechter Kontakt an einem Stromrichtertransformator für stationäre Thyristorerregung

Bild 3: Lage und Art der durch die HF-Störspannungsüberwachung erkannten Fehler

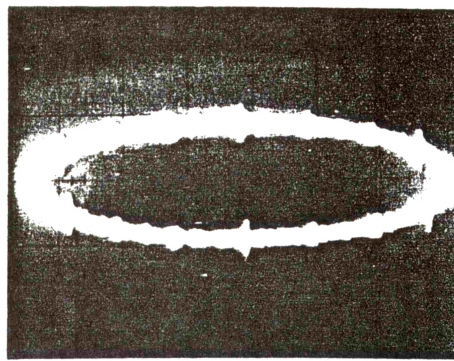
3.1 Schlechte Erdung der Generatorwelle

Zur Vermeidung von Lagerschäden durch unkontrollierte Wellenströme sind auf der Turbinenseite der Generatorwelle Erdungsbürsten angebracht. Buckley et. al. /11/ weisen auf die Bedeutung einer Bürstenüberwachung für die Betriebssicherheit der Maschine hin. Diese Aufgabe übernimmt der HF-Monitor, wie das folgende Beispiel zeigt.

Bei einem 1640-MVA-Generator stieg der Pegel der HF-Überwachung bis zur Alarmgrenze an. Die Impulsoszillogramme zeigten an allen drei Phasen gleichmäßig verteilte Impulse ohne feste Phasenzuordnung. Das gleiche Erscheinungsbild, jedoch mit höheren Amplituden, lieferte auch das Oszillogramm der Erregerlagermeßstelle (Bild 4 a).

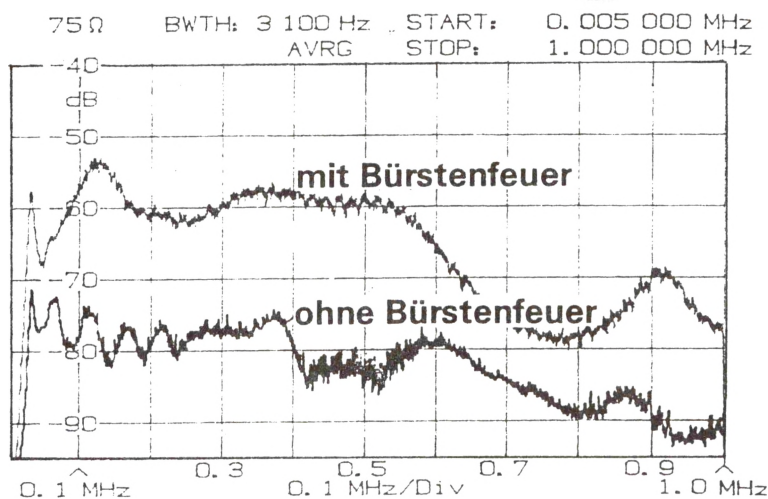


mit Bürstenfeuer



ohne Bürstenfeuer

a) Impulsoszillogramm des HF-Monitors



b) am HF-Monitor aufgenommene Frequenzspektren

Bild 4: Bürstenfeuer an unzureichend aufliegenden Wellenerdungsbürsten bei einem Turbogenerator

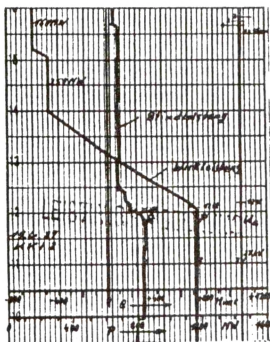
Im schmalbandigen Frequenzspektrum wurde speziell am Erregerlager ein hoher Pegelanstieg um mehr als 20 dB in einem weiten Frequenzbereich bis über 1 MHz gemessen (Bild 4 b).

Aus dem Erscheinungsbild der Störimpulse an den vier Meßstellen und den Frequenzspektren konnte auf eine Funkenbildung im Bereich der Generatorwelle geschlossen werden. Durch Andrücken der Erdbürsten war der Störpegel kurzzeitig zu beseitigen. Eine langfristige Verbesserung wurde durch Änderung der Bürstenfedern erreicht.

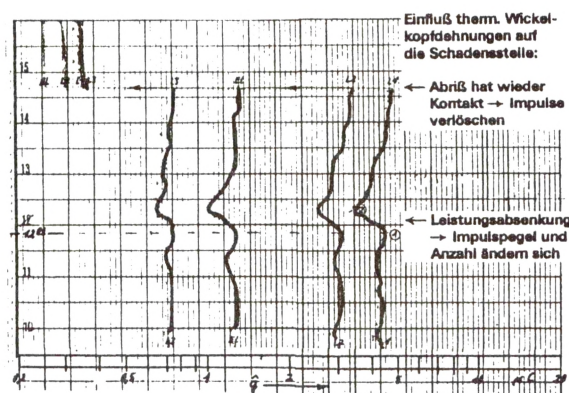
3.2 Gebrochene Potentialanbindung einer Schaltleitung im Generator

Auf dem HF-Monitor, der einen 1600-MVA-Generator eines Kernkraftwerkes überwacht, traten bei bestimmten Leistungszuständen zeitweise hohe Entladungen auf. Im Laufe von einigen Wochen stabilisierten sich die Impulse über einen wachsenden Leistungsbereich. Bild 5 zeigt am Beispiel einer Lastabsenkung die Signalveränderungen auf dem HF-Monitor-Schrieb. Leistungsabhängige thermische und mechanische Einflüsse an der Schadensstelle verändern Höhe und Anzahl der Impulse und führen sogar zum Verlöschen.

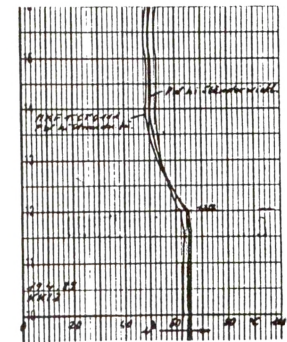
Generatorleistung



Impuls Ladungspegel $\dot{q} = f(t)$ des HF-Monitors



PW-Temperatur Ständerwicklung



Impulsoszillogramme des HF-Monitors bei 1 170 MW, 300 Mvar

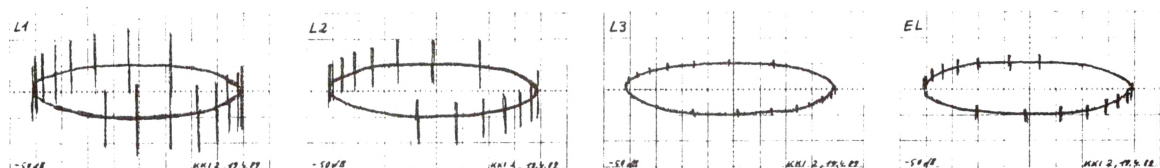


Bild 5: Abreißfunken an einer gebrochenen Potentialanbindung einer Schaltleitung der Ständerwicklung bei Absenkung der Generatorleistung

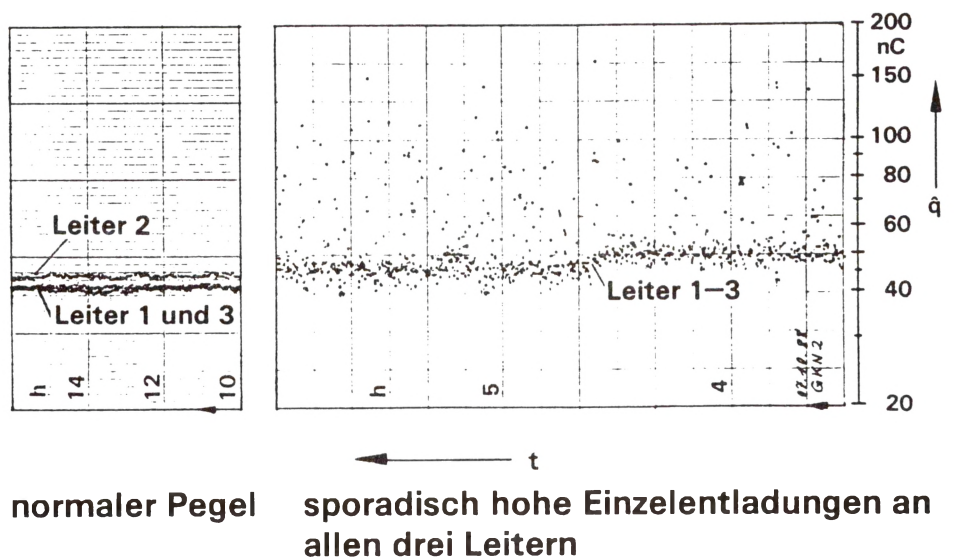
Aus dem Vergleich der Impulssoszillogramme an den vier Meßstellen kann bei Kenntnis der Generatorkonstruktion auf die Art und den möglichen Ort derartiger Entladungen geschlossen werden. Sie zeigen alle charakteristischen Merkmale einer unterbrochenen Verbindung eines spannungführenden Leiters, der zu beiden Wicklungssträngen Kontakt hat. Ein von Kreuger /12/ aufgestellter Katalog typischer Impulssoszillogramme erleichtert die Diagnose.

Nach Abschaltung des Blockes und Öffnen des Generators wurde ein Abriß der Potentialanbindung für einige Schaltleitungen gefunden. Unter der Einwirkung energiereicher Entladungen wäre die Isolierung einer der Schaltleitungen an dieser Stelle in wenigen Wochen örtlich zerstört worden. Das hätte zum Ständererdschluß mit einer längeren Reparaturzeit geführt.

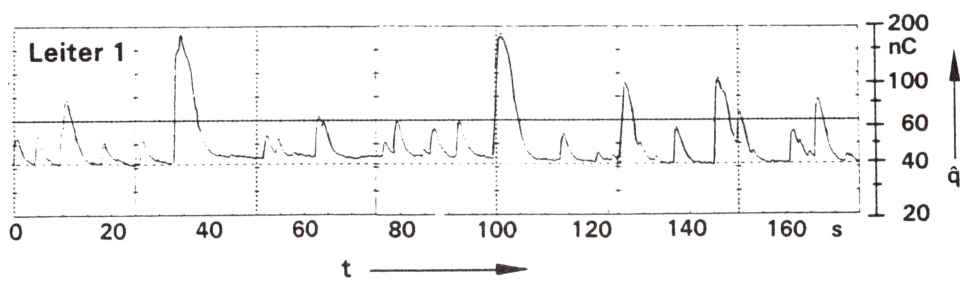
3.3 Entladungen in einem 850-MVA-Transformator

Bei einem Kraftwerksstillstand wird der Eigenbedarf im allgemeinen über die Maschinen- und Eigenbedarfstransformatoren aus dem Hochspannungsnetz versorgt. Hierbei ist der Generatorschalter geöffnet. Da die zur Meßan-
kopplung verwendeten Netzschutzkondensatoren entsprechend Bild 1 transformatorseitig an die Ableitungen angeschlossen sind, ist auch in diesem Betriebszustand eine HF-Überwachung der Transformatoren gegeben. Das folgende Beispiel, das der Anfahrphase eines 1350-MW-Kernkraftwerkes entstammt, zeigt den Vorteil dieser transformatornahen HF-Ankopplung.

Während des o. g. Betriebszustandes der Eigenbedarfsversorgung traten am Punktschreiber des HF-Monitors streuende Werte auf (Bild 6 a). Die sporadischen Entladungen hatten sehr unterschiedlichen Energieinhalt und keine feste Phasenzuordnung. Sie waren an allen drei Leitern in gleicher Weise zu beobachten. In Bild 6 b ist am Beispiel des Leiters L1 eine Folge derartiger unregelmäßiger Entladungen über 5 min dargestellt. Die Impulse wurden mit einem Transientenrecorder aufgezeichnet, der am y-t-Ausgang des HF-Monitors angeschlossen war.



a) Punktschreiberaufzeichnungen vom HF-Monitor



b) Kontinuierliche Darstellung der Impulse am y-t-Schreiberausgang des HF-Monitors

Bild 6: Energiereiche elektrostatische Entladungen in einem 850-MVA-Maschinentransformator eines Kernkraftwerkes

Parallel zum HF-Monitor lieferte auch die kontinuierliche Gas-in-Öl-Analyse (DGA) an einem der beiden Maschinentransformatoren ansteigende Mengen niederer Kohlenwasserstoffe. Daraufhin durchgeführte Ultraschallmessungen am Transformatorkessel ergaben lediglich wechselnde Entstehungsorte dieser energiereichen, spontanen Entladungen. Während das Abschalten der Hochspannung die Entladungen kaum beeinflusste, waren sie kurz nach dem Ausschalten der Ölumwälzpumpen verschwunden. Aufgrund dieser Tatsache wurden als Ursache elektrostatische Aufladungen durch die Ölströmung diagnostiziert.

Das Auswechseln der Ölsorte brachte den erwarteten Erfolg. Der Punktschreiberausgang in Bild 6 a zeigt nun einen normalen HF-Störpegel, der durch periodische Signale aus dem Eigenbedarf bestimmt wird.

4. Aussagekraft und Systemeinbindung

Die Meßergebnisse aus über 40 Kraftwerkblöcken unterschiedlicher Bauart beweisen, daß die HF-Störspannungs-Überwachung ein empfindliches Verfahren zur Früherkennung elektrischer Fehler ist. Anlagenspezifische und betriebsbedingte Störsignale, die auf die Meßgenauigkeit einwirken könnten, lassen sich eindeutig erkennen und zum Teil durch Filter und Ausblendschaltungen unterdrücken. An einer weiteren Steigerung der Meßempfindlichkeit einerseits mit Mitteln der Analogtechnik bei der Signalauskopplung und andererseits mit digitaler Meßwertverarbeitung wird derzeit gearbeitet.

Der neue Baustein "HF-Störspannungs-Überwachung" ist so ausgelegt, daß er leicht in ein vorhandenes integriertes Betriebsüberwachungssystem einzufügen ist. Im Zusammenwirken mit anderen Überwachungseinrichtungen lassen sich damit relevante Veränderungen und Schäden an den elektrischen Betriebsmitteln bereits im Anfangsstadium erkennen und kontinuierlich beobachten. Anhand der Trendentwicklung der Meßgrößen können wichtige Schlußfolgerungen bezüglich Fehlerart, weiterer Betriebsstrategie und Reparaturmaßnahmen gezogen werden. Diese Aufgaben könnten in Zukunft Expertensysteme übernehmen.

5. Schrifttum

- /1/ Kurtz, M.; Stone, C. G.; Freeman, D.; Mulhall, V. R.; Lonseth, P.:
Diagnostic Testing of Generator Insulation without Interruption.
Cigre 1980, Paris, Paper 11-09

- /2/ Kurtz, M.; Lyles, J. F.:
Generator Insulation Diagnostic Testing.
IEEE Trans. on Power App. and System PAS-98 (1979)
No 5, S. 1596 - 1602

- /3/ Emery, F. T.; Lenderking, B. N.; Couch, R. D.:
Turbine-Generator On-Line Diagnostics Using RF Monitoring.
IEEE Trans. on Power App. and System PAS-100 (1981)
No 12, S. 4974 - 4982

- /4/ Davey, R. T.:
Generator Radio Frequency Monitoring Improves Protection.
Power Engineering, Sept. 1986, S. 44 - 46

- /5/ Emery, F. T.; Harrold, R. T.:
Radio Frequency Response of a Large Turbine Generator
Stator Winding.
IEEE/PES 1985 Winter Meeting, New York, Paper 85 WM 139-1

- /6/ Timperley, J. E.:
Incipient Fault Identification Through Neutral RF-Monitoring
of Large Rotating Machines.
IEEE Trans. on Power App. and System, PAS-102 (1983)
No 3, S. 693 - 697

- /7/ Malik, A. K.; Cook, R. F.; Tavner, P. J.:
The Detection of Discharges in Alternators Using Wideband
Frequency Techniques.
Conf. on Electr. Machine Design and Application,
IEE Conf. Publ. 254 (1985), S. 121 - 125

- /8/ Stone, G. C.:
Theory of the Partial Discharge Analyser Test.
EPRI/CEA Workshop on the PDA and RF-Monitoring,
Toronto 1986, Canada
- /9/ Wichmann, A.; Grünewald, P.; Weidner, J.:
HF-Störspannungsmessungen in Kraftwerksblöcken zur Erkennung
von Fehlern in Hochspannungsgeräten.
Elektrizitätswirtschaft 84 (1985) H. 24, S. 1009 - 1012
- /10/ König, G.; Feser, K.:
A New Digital Filter to Reduce Periodical Noise in Partial
Discharge Measurements.
Sixth Intern. Symp. on High Voltage Engineering, 1989,
New Orleans, USA
- /11/ Buckley, G. W.; Corkins, R. J.; Stephens, R. N.:
The Importance of Grounding Brushes to the Safe Operation
of Large Turbine Generators.
IEEE Trans. on Energy Conversion EC-3 (1988), No. 3,
S. 607 - 612
- /12/ Kreuger, F. H.:
Recognition of Discharges.
Electra No. 11 (1970), S. 61 - 98