

Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung an SF₆-Schaltanlagen und an PE-Hochspannungskabeln nach dem Serienresonanz-Prinzip

H. Binz und H.G. Gerlach

Wegen der benötigten hohen Blindleistung erfolgen Vor-Ort-Isolationsprüfungen an gasisolierten, gekapselten Schaltanlagen und an verlegten Hochspannungskabeln vorzugsweise mit Einrichtungen nach dem Serienresonanzprinzip. Die FKH führt derartige Isolationsprüfungen an Hochspannungssystemen durch und berichtet hier über einige Aspekte aus ihrem Erfahrungsbereich.

Etant donné la grande puissance réactive requise, les essais d'isolement sur place pour installations de couplage blindées, isolées au gaz, et pour câbles à haute tension posés ont lieu de préférence avec des circuits basés sur le principe de la résonance de tension. La Commission d'étude de l'ASE et de l'UCS des questions relatives à la haute tension (FKH), qui procède à ces essais, en indique divers aspects.

Adresse der Autoren

Dr. H.G. Gerlach, geschäftsführender Versuchsleiter, H. Binz, Mitarbeiter, Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Dörflistrasse 67, 8050 Zürich.

Gasisolierte gekapselte Schaltanlagen und verlegte Kunststoffkabel für Hochspannung sollten nach der Montage einem abschliessenden Isolations-test unterworfen werden, weil die hochbeanspruchten Dielektrika dieser Systeme erfahrungsgemäss Beeinträchtigungen bei der Montage erleiden können, welche einen störungsfreien Betrieb am Netz in Frage stellen. Wegen der erforderlichen hohen Leistungsumsätze, die der Objektkapazität und dem Quadrat der Prüfspannung proportional sind, kommen Prüftransformatoren kaum in Betracht. Prüfeinrichtungen nach dem Serienresonanzprinzip, welche mit variabler Frequenz abgestimmt werden, haben sich als eine wirtschaftliche Lösung erwiesen. Die Prüfung mit Wechselspannung entspricht der Betriebsbeanspruchung, obwohl eine leicht erhöhte Prüffrequenz angewendet wird.

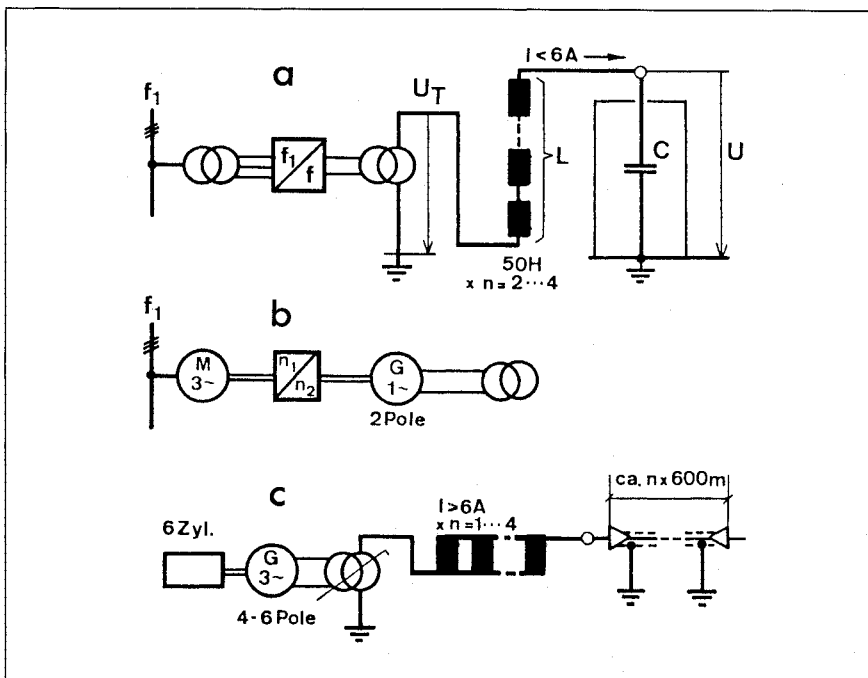
Die FKH führt Isolationsprüfungen an Hochspannungssystemen durch, vor allem in den Anlagen der Elektrizitätswerke. Seit einigen Jahren ist sie im Auftrag der Ersteller oder der Betreiber von Anlagen auch im Ausland tätig. Sie unterhält eigene leistungsfähige Prüfeinrichtungen, die sie selbst entwickelt hat, und setzt diese auch weltweit ein. Die Isolationsprüfungen umfassen Stehspannungsprüfungen mit Wechselspannung bis 600 kV oder mit Stossspannung bis 1200 kV sowie Teilentladungsmessungen bis 400 kV. In der Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung hat die FKH eine international führende Stellung. Sie hat die Resonanzprüfung mit Leichtgewichtsreaktoren konstanter Induktivität vor ungefähr 10 Jahren eingeführt, und sie investiert ihre praktische Prüferfahrung in die Weiterentwicklung von bestgeeignetem Prüfgerät.

1. Prinzip der Resonanzprüfung mit variabler Frequenz

Der Wechselspannungs-Isolationstest an grossen Hochspannungsanlagen mit Kapazität C und Prüfspannung U erfordert eine hohe reaktive Prüfblindleistung

$$P_r = U \cdot I = 2\pi f(C \cdot U^2)$$

so dass ohne Ausnutzung der spannungsverstärkenden Serienresonanzschaltung (Figur 1) überhaupt keine Möglichkeit zur praktischen Beherrschung der Leistungsumsätze gegeben wäre. Je nach Grössenordnung des Produkts CU^2 kommen Prüftransformatoren wegen ihres grossen Gewichts für einen Vor-Ort-Baustelleneinsatz nicht in Frage, oder sie stehen mangels ausreichender Leistungsfähigkeit überhaupt nicht zur Verfügung, nicht einmal in den grössten Hochspannungslaboratorien. Die reaktive Kompensationsleistung kann in Spulengruppen mit schaltungstypischer, im übrigen aber fester Induktivität L bei optimal niedrigem Transportgewicht untergebracht werden. Beispielsweise wiegt ein Reaktormodul der neusten Bauart transportbereit nur 430 kg bei einer Leistung von über 2500 kVA, so dass derzeit Prüfleistungen über 20 000 kVA mit einem Aufwand von nur 8 Spulen möglich werden, was einem Transportgewicht von nur 3,5 t entspricht. Für die Speisung stehen verschiedene Stromquellen zur Verfügung, die dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst sind (Fig. 1). Speziell für die Kabelprüfung soll ein Twin-Dieselaggregat von 2×100 kVA Leistung bereitgestellt werden, das ebenfalls nur 3,5 t wiegen wird.



Figur 1 Prüfkreis mit Ausführungsbeispielen

- a Thyristorrichter mit zwei Transformatoren für vier Spulen in Reihe. Rechteckspannung 500 V; Trafo 9 kV/50 kVA, max. 300 Hz
- b Motorgenerator mit stufenlosem Getriebe für kleine Leistungen. Sinusspannung 860 V; Generator 10 kVA, max. 100 Hz, 2polig
- c Dieselgenerator mit aufgebautem Stufentrafo für vier Spulen parallel. Sinusspannung 1000 V; Trafo max. 5 kV/100 kVA, max. 100–150 Hz, Generator 4–6polig

- C Kapazität des Prüfobjekts
- L Induktivität von max. vier Drosselspulen in Reihe (linear bis max. 6 A)
- I Ladestrom bei der Prüfspannung, nichtlinear falls ≥ 6 A je Spule
- U Prüfspannung
- U_T Quellenspannung = Ausgangsspannung am Transformator
- f variable Frequenz der Quelle
- f_1 feste Frequenz des Versorgungsnetzes (50–60 Hz)
- n_2 Antriebsdrehzahl (max. 6000 min⁻¹)

Sind f_0 , Z_0 die charakteristischen, nur mit L , C zusammenhängenden Bestimmungsgrößen des Hochspannungs-Schwingkreises bzw.

$$2\pi f_0 = (LC)^{-1/2} = \text{Resonanzkreisfrequenz}$$

$$Z_0 = (L/C)^{1/2} = \text{Wellenimpedanz bzw. Schwingungsimpedanz}$$

so berechnet sich der Ladestrom I in einem engen Arbeitsbereich der Resonanzkurve nach Figur 2, näherungsweise ohne Einfluss der Verstimmung Δ zu

$$I = U / Z_0$$

Wenn weiter im Hochspannungskreis die Spulenverluste (Ersatzwider-

stand R) gegenüber allen übrigen Verlusten entscheidend überwiegen, so wird die erreichbare Spannungsverstärkung

$$V = U / U_T < Q = Z_0 / R = 2\pi f_0 \cdot L / R$$

nicht von unmessbaren Größen des Versuchsaufbaus abhängig sein, und die Güte Q der Spulen steigt einfach proportional mit der Prüffrequenz f . Hieraus geht hervor, dass es keinen Sinn hätte, die Prüffrequenz unter die Netzfrequenz f_1 abzusenken. Der wichtigste Frequenz-Arbeitsbereich liegt um 65–100 Hz. Hierbei werden Gütefaktoren $Q > 100$ –150 erreicht. Fre-

quenzen unter 65 Hz verbieten sich bei Anlageprüfungen wegen der Möglichkeit von Ferroresonanzen mit induktiven Spannungswandlern. Höhere Frequenzen als 100 Hz spielen nur eine Rolle bei besonders kleinen Prüfkapazitäten. Es wäre sinnlos, wegen der Abstimmung mehr als 4 Spulen zu je 50 H in Reihe einzusetzen, da man mit leichten (und auch billigen) Parallelkapazitäten eine wirksamere Abstimmung erreichen kann. Als obere Grenze wird bei den SF₆-Anlagen eine Prüffrequenz von 300 Hz zugelassen. Maschinenumformer und Generatoren arbeiten zweckmässigerweise in einem Bereich bis 100 Hz oder polumschaltbar bis 150 Hz (Fig. 1b, c).

Für die Belastung der Speisequellen ist ausser der Güte (Q) auch der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ wichtig, der durch die Verstimmung (Δ = Abstand vom Resonanzpunkt f_0 , Fig. 2) bzw. durch die Übersetzung des Anpasstransformators festgelegt wird. Mit $\Delta = 1 - f/f_0$ und $\text{tg}\varphi = 2Q \cdot \Delta$ gilt auch

$$V = U / U_T = Q \cdot \cos\varphi \text{ und } U_T = U / (Q \cos\varphi) > U / Q$$

Für Stabilitätsfragen ist die Stellempfindlichkeit dV/df wichtig, mit welcher die Resonanzspannung U auf eine beabsichtigte (Steuerung) oder unbeabsichtigte Frequenzänderung (Störung) reagiert:

$$\frac{dV}{df} = \frac{2Q}{f_0} \cos^2\varphi \sin\varphi$$

Die Stellempfindlichkeit wird klein bei grossem Resonanzabstand (übermässige Quellenspannung, nicht angepasster Transformator oder triviale Stabilität mit $\cos^2\varphi \rightarrow 0$), aber auch bei optimaler Anpassung ($\sin\varphi \rightarrow 0$). Die maximale relative Spannungsänderung tritt bei einem Phasenwinkel von $\varphi = 35^\circ$ auf, hierbei ist

$$\text{tg}\varphi = 1/\sqrt{2} = 0,7 \text{ und } \text{Max}(dV/df) = 0,385 \cdot 2Q/f_0$$

Innerhalb eines bei grossen Leistungsumsätzen anzuwendenden engen Arbeitsbereichs von $0 < \varphi \leq 35^\circ$ ändert sich die Spannungsverstärkung um weniger als 20%:

$$1 > V/Q \geq 0,817 (35^\circ)$$

Beispielsweise erhält man mit Bezug auf eine Mindestgüte von $Q = 150$ bei $f_0 = 100$ Hz eine differentielle Span-

nungsänderung bis zu 115 mal grösser als die verursachende Frequenzänderung. Dies bedeutet, dass über die Hälfte des genannten Bereiches von 20% an der empfindlichsten Stelle schon bei einem Frequenzhub von nur 1‰ = 0,1 Hz auftreten kann, entsprechend

$$\Delta V(35^\circ) = (200 \cdot 0,385)(\Delta f/f_0)$$

Daraus abzuleitende Qualitätsanforderungen setzen darum entweder eine hochpräzise astatistische Frequenzsteuerung voraus, die für den netzgespeisten elektronischen Umrichter nach Fig. 1a typisch ist, oder eine weiche Leistungssteuerung mit ausreichender Kennlinienstatik als typische Realisierungsform der Maschinenlösung (Fig. 2).

2. Entwicklung von Resonanzprüfeinrichtungen

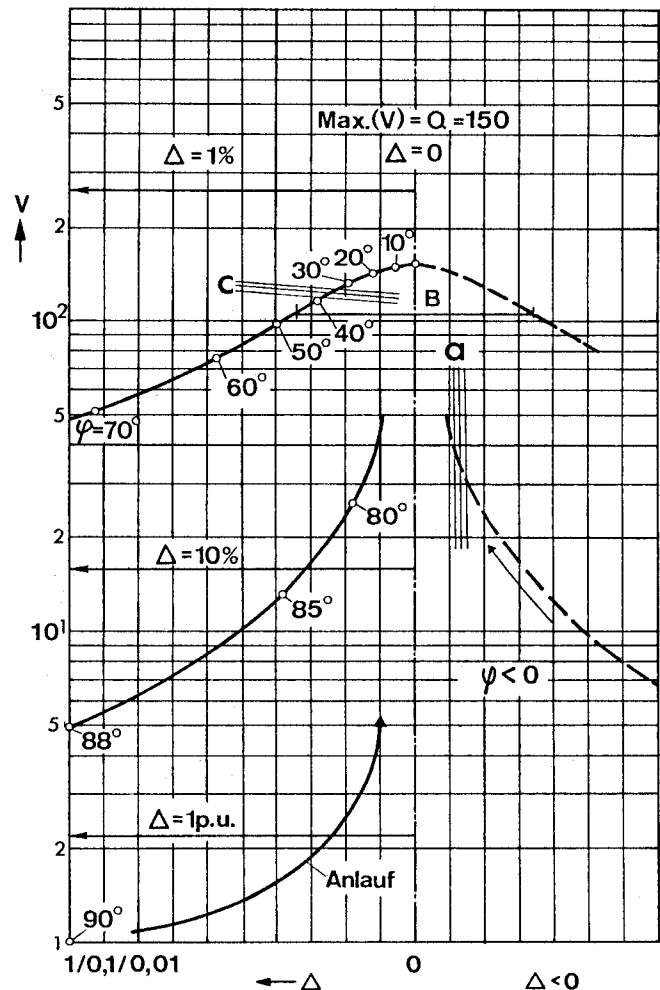
Die Anfänge reichen ins Jahr 1976 zurück, als auf Initiative von W. Zaengl die Entwicklung einer leichten und leistungsfähigen Wechselspannungsprüfeinrichtung gefordert und beschlossen wurde [1]. Damals entstand das Konzept zur Anlageprüfung mit vier in Reihe geschalteten Reaktoren zu je 50 H und mit netzgespeistem Thyristorumrichter. Die heute noch verwendete Einrichtung wurde von der FKH in Zusammenarbeit mit Industrie und Hochschule aufgebaut. Bei einem Labortest wurde mit kleiner Lastkapazität und entsprechend hoher Prüffrequenz eine Spannung von 800 kV erreicht [2]. Die Spulendaten wurden danach und auf der Grundlage eines ungesättigten Stabeisenkerns zu 200 kV, 100 Hz, 6 A, 10 min festgelegt. Entsprechend wurde der Umrichter für 50 kVA, 10 min, 500 V Rechteckspannung ausgelegt.

Seit der ersten Inbetriebnahme bei einer Anlageprüfung im Jahr 1980 wurde viel Erfahrung in der Ausführung von Prüfungen und im Umgang mit dem Testmaterial gesammelt. Die Prototypausrüstung ist heute noch ausreichend für die Prüfung von SF₆-Anlagen jeder Grösse, auch wenn inzwischen erkannt worden ist, dass die Spulen der ersten Generation unter realen Vor-Ort-Testbedingungen nur mit 150 kV, 6 A (< 1000 kVA) zu belasten sind.

Ein erster Impuls für neue Entwicklungen kam daher, dass eine Sinus-

Figur 2
Lineare Resonanzverstärkung bei einer Kreisgüte Q=150

- V Verstärkungsfaktor U/U_T in Funktion von φ und Δ
- φ Phasenwinkel der Quelle I vor U_T (positiv im Anlauf aus Stillstand)
- Δ Verstimmung $1-f/f_0$ (Resonanzlage f_0 bei $\Delta=0$)
- a Bereich Frequenzsteuerung (astatisch) und Arbeitsbereich um 400 kV zum Prüfkreis 1a
- c Bereich Leistungssteuerung (lastabhängige Neigung = Statik) und angepasster Arbeitsbereich bei grosser Leistung nach Prüfkreis 1c



stromquelle zur Ausführung von Teilentladungsmessungen benötigt wurde. Dies führte zu einer Maschinenlösung nach Fig. 1b. Die positive Erfahrung mit dem Motorgenerator (10 kVA, 250 kg) sowie der Bedarf an grösseren Leistungen bei der Prüfung von Kabeln führten zu einem weiteren Maschinenkonzept mit Antrieb durch Verbrennungsmotoren (Fig. 1c). Für den Dieselgenerator war entscheidend, dass die bisher in Reihenschaltung verwendeten Drosselspulen jetzt hochausgenutzt in Parallelschaltung zu betreiben waren und dass auch mit Teilströmen über 6 A je Spule zu rechnen war, wobei ganz bewusst eine Sättigung der Stabkerne in Kauf genommen wurde. Der einzelne Generator kann 4-5 voll ausgelastete Spulen versorgen. Man geht heute davon aus, dass sowohl die parallel geschalteten Reaktoren als auch die Generatoren Modulbausteine darstellen, die entsprechend dem Blind- und Wirklei-

stungsbedarf bei Kabeln von wechselnder Länge zu passenden Batterien zusammengestellt werden. Hierbei spielt auch die Netzunabhängigkeit eine Rolle. Die gegenwärtig laufende Entwicklung eines Twin-Dieselaggregats ist noch nicht abgeschlossen.

Der Übergang zu grösseren Leistungen setzte auch eine gleichzeitige Weiterentwicklung der Spulen voraus, weil diese nun über die erwartete Kabelprüfspannung hinaus ($U = 230$ kV) spannungsfest sein müssen. Als Ergebnis dieser Arbeiten liegt eine Spule vor, welche mit 250 kV, 11 A (> 2500 kVA) angeschrieben werden kann. Zukünftige Entwicklungsziele tendieren auf einen verbesserten Thyristorumrichter, der es möglich machen soll, Anlageprüfungen bis 520 kV Wechselspannung mit nur zwei Spulen bei einem Transportgewicht von 1,5 t für die gesamte Ausrüstung durchzuführen.

3. Akzeptanz und Prüfvorschriften

Eine Vor-Ort-Isolationsprüfung entscheidet über Annahme oder Rückweisung der erstellten Anlage. Daher müssen sich Ersteller und Betreiber von Anlagen vor der Abnahmeprüfung über den Prüfmodus einigen, was in aller Regel aufgrund von anerkannten Normen der Fall ist. Fehlen solche Normen, so kann der Geschäftsablauf und auch die Prüfung erheblich erschwert werden. Die Normen stellen den Stand der Technik dar, allerdings oft mit einer gewissen Verzögerung. Im Fall der Resonanzprüfung von Schaltanlagen war von Anfang an klar, dass man der Wechselspannungsprüfung mit von der Netzfrequenz abweichender Frequenz skeptisch gegenüberstehen würde, solange eine mögliche Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von der Frequenz ungeklärt war. Gezielte Arbeiten auf diesem Gebiet [2; 3] haben relativ rasch zu einer IEC-Empfehlung geführt [4], welche die Anwendung von Prüffrequenzen bis 300 Hz als zulässig bezeichnet.

Auch an der internationalen Anerkennung des Verfahrens hat die FKH mitgewirkt, einmal indirekt durch Mitfinanzierung von Forschungsarbeiten [3], aber auch direkt durch überzeugende Werbeargumente anlässlich vieler erfolgreich durchgeführter Prüfungen. Sie hat auch selbst die Wirkung von fehlenden Normen erfahren. So wurde in einem Entwicklungsland von der Abnahmebehörde entschieden, dass die Prüffrequenz «möglichst nahe an 60 Hz» liegen müsse; dies hatte dann zur Folge, dass die mitgeprüften Spannungswandler tatsächlich in Sättigung gingen und Ferroresonanz auftrat (gefährlich unkontrollierbares Überspannungsverhalten im Hochspannungskreis). Kipperscheinungen mit ähnlichen Konsequenzen können auftreten, wenn eine Einrichtung nach Figur 1a mit astatischer Frequenzsteuerung gemäss Figur 2 (Bereich a) auf Reaktoren arbeitet, welche sich wegen Überlastung zu sättigen beginnen.

Die Interpretation von Gasdurchschlägen, die bei einer Vor-Ort-Prüfung auftreten, ist Aufgabe der Hersteller. Manche führen Konditionierungszyklen durch, welche darin bestehen, verschiedene Spannungen auf niederem Niveau (ab 60% Prüfspannung) während längerer Zeit anzulegen (bis 30 min), wobei das Niveau der Konditionierungsspannung bis zur

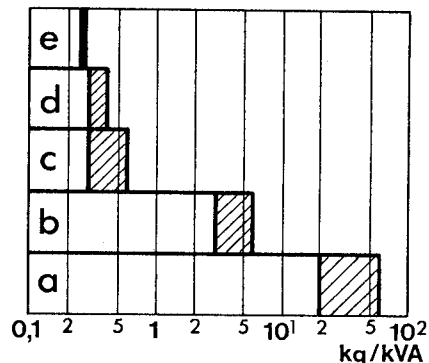
Prüfspannung in Stufen gesteigert wird. Einzelne Überschläge in der Konditionierungsphase werden nicht als Durchschlag gewertet (sog. Reinigungsüberschläge). Die Konditionierung ist nicht Bestandteil der Regel, auch nicht der Abnahmeprüfung. Der Prüfer muss aber in der Lage sein, die verlangten Voraussetzungen mit seiner Einrichtung auf Wunsch zu fahren.

Bei den Kabelprüfungen liegt im Augenblick noch keine verbindliche Norm vor. Dies wäre wahrscheinlich auch zu früh. Abgesehen von einigen erfolgreichen Versuchen mit kurzen Kabeln im Übergangsbereich zu anlagentypischen Kapazitätswerten (≤ 600 m Kabel) wurde erst ein einziger wirklicher Pilotversuch durchgeführt. Dieser Versuch erforderte drei Spulen parallel mit dem Dieselgenerator gemäss Anordnung von Figur 1c.

4. Erfahrungen

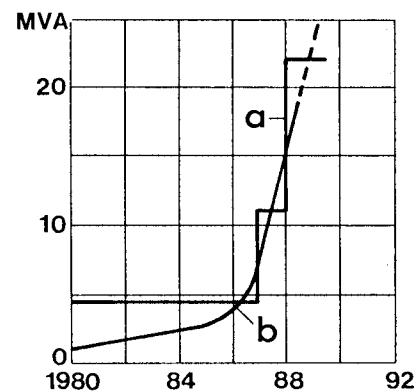
Mit der Resonanzanlage nach Figur 1a wurde dem Testingenieur erstmals ein leistungsfähiges Vor-Ort-Prüfgerät für Wechselspannung bei akzeptablem Gewicht in die Hand gegeben. Die Gewichts-Einsparungsmöglichkeiten, welche sich bei fortschreitendem Stand der Technik ergeben haben, sind in Figur 3 anhand der spezifischen Leistungsgewichte dargestellt. Auffallend ist, dass durch Serienresonanzanlagen mit fester und später mit variabler Frequenz eine Reduktion des Leistungsgewichts von jeweils einem Faktor 10 möglich war. Die mit Dieselgenerator gespeiste und mit neuen Leichtgewichtsreaktoren ausgestattete Version bewirkte eine weitere Gewichtsreduktion bezogen auf die Leistung. Die Entwicklung der Leistungsfähigkeit der Anlagen und des Leistungsbedarfs ist in Figur 4 dargestellt.

Der Prototyp der Serienresonanzanlage mit Thyristorumrichter wurde im Mai 1980 fertiggestellt und anschliessend im Hochspannungslabor der ETHZ ausgetestet (Fig. 5). Nachdem sich die Erwartungen der Konstrukteure erfüllt hatten, erhielt die FKH gleichen Jahres einen ersten Prüfauftrag für die neu erstellte SF₆-Anlage im Unterwerk Sihlfeld (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, EWZ). Die von der Anlage zu den Transformatoren führenden 150-kV-PE-Kabel wurden bei dieser Gelegenheit ebenfalls geprüft. Die Tauglichkeit des neuen Prüfgeräts konnte somit in mehrfacher Hinsicht unter Beweis gestellt werden. Die Prü-



Figur 3 Leistungsgewichte von kompletten transportbereiten Wechselspannungs-Prüfeinrichtungen mit Hilfsmaterial

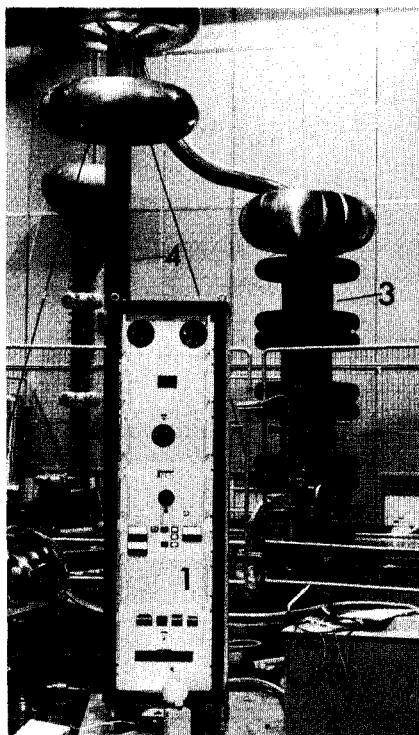
- a konventionelle Prüftransformatoren
- b Serienresonanzanlagen für Netzspeisung mit fester Frequenz
- c Serienresonanzanlage mit variabler Frequenz nach Fig. 1a mit 1-4 Drosselspulen (FKH-Prototyp)
- d Resonanzanlage mit 1-4 Hochleistungsreaktoren und mit einem Dieselgenerator nach Fig. 1c (FKH-Maschine, Prototyp). Bei zwei Generatoren und 5-8 Spulen liegt das mittlere Transportgewicht etwa bei 0,33 kg/kVA
- e projektierter Leichtgewichtsversion eines neuen Umrichters mit 1-2 Reaktoren für mässige Leistungen wie Fig. 1a, speziell geeignet für Lufttransporte



Figur 4 Entwicklung der Prüfleistungen seit 1980

- a Angebot gemäss Baufortschritten der FKH
- b Interpolierter Bedarf gemäss ausgeführten Prüfungen

fung einschliesslich Auf- und Abbau sowie Hin- und Rücktransport dauerte nur einen Tag. Dabei wurde ein grosser Teil der Einsatzzeit für das Umsetzen einer Testdurchführung auf andere



Figur 5 Prototyp im Hochspannungslabor der ETH Zürich

Quasi-Leerlaufversuch mit 800 kV bei 800-900 Hz

- 1 Thyristorrichter max. 50 kVA, 500 V Rechteck
- 2 Dreiphasen-Speisetransformator 50 kVA, KB 10 min
- 3 Drosselspulen in Reihenschaltung $n=4$, $L=200$ H
Erstaussführung ausgestattet mit Doppelschirmringen
- 4 kapazitiver Spannungsteiler als Lastkapazität

Phasen benötigt. Es wurden nur zwei Reaktoren verwendet, das Testmaterial wog lediglich 2,5 t. Die Schaltanlage war mit 260 kV, 1 min phasenweise zu prüfen, die Kabel wurden phasenparallel mit 150 kV, 1 min geprüft. Der Hochspannungsschwingkreis bestand aus $L = 100$ H und $C = 4,5$ nF/Phase (Schaltanlage) bzw. $C = 55$ nF (parallele Kabel). Es stellten sich Frequenzen von $f = 230$ Hz (Anlageprüfung) bzw. $f = 86$ Hz (Kabelprüfung) ein. Die Spannungswandler konnten in beiden Fällen mitgeprüft werden.

Im Anschluss an diesen Ersteintritt wurde die Serienresonanzanlage von einem Hersteller für mehrere Prüfungen in Norwegen und in Koeberg (Südafrika) angefordert. Der Transport nach Norwegen erfolgte per Lastwagen, die Reise nach Südafrika per Flugzeug. In beiden Fällen betrug das Gewicht 3,5 t mit vier Reaktoren (Anlageprüfungen Reihe 420 kV). In Koeberg stand die Testeinrichtung an der prallen Sonne bei bis 50 °C am Schatten und wurde ausserdem thermisch vollständig ausgenutzt (Fig. 6). Bei den Prüfungen in Norwegen dagegen war die Aussentemperatur während längerer Zeit extrem niedrig (-25...-30 °C). Dort wurde bei Phasenkapazitäten bis 15 nF eine sehr hohe Prüfspannung gefordert (520 kV, 1 min), so dass bei nur drei Spulen in Reihe eine spannungsmässige Vollbelastung aufgetreten ist.

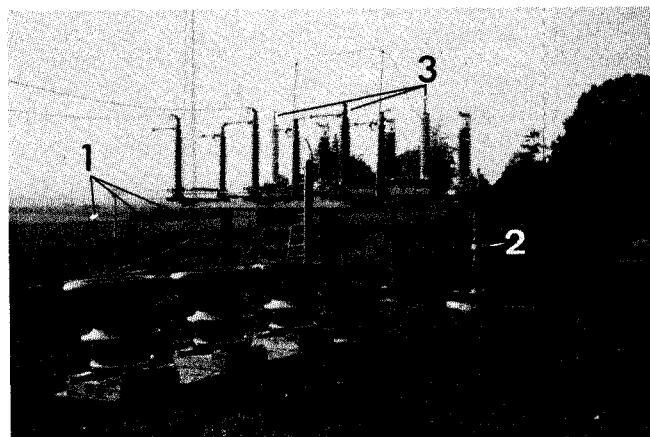
Es folgten weitere Prüfungen in den Spannungsebenen 132-150 kV bei schweizerischen Elektrizitätswerken. Meist wurden hierbei kürzere Kabelausleitungen mitgeprüft (Transformator-kabel). In der Bundesrepublik wurde die Resonanzprüfeinrichtung erstmals bei der Elektrizitätsversorgung Schwaben (EVS) eingesetzt, wo eine grosse 110-kV-Schaltstation beim Dampfkraftwerk Heilbronn gesamtlich (d.h. ohne Sektionierung) mit Wechselspannung zu prüfen war. Weitere Anlagen der Spannungsebenen 110 kV und 420 kV schlossen sich an, und die anfänglich nur mitzuprüfenden, später auch einzeln zu prüfenden Kabelstrecken wurden immer länger. Mit der Erfahrung wuchs auch das Vertrauen der Kunden in die Wechselspannungsprüfung an PE-Kabeln bei Prüffrequenzen bis 100 Hz. Das Prüfungsniveau stieg von anfänglich 135 kV, 15 min auf 230 kV, 1 min. Damit war der Thyristorrichter an seiner Leistungsgrenze angekommen. Ende 1987 konnte bei einem Pilotversuch an einem 1,5 km langen Kabel 230 kV in Vaihingen erstmals die Speisung nach Figur 1c eingesetzt werden (Fig. 7). Da bei der Vor-Ort-Prüfung an einem Kabel ein Durchschlag erfolgte, welcher einen Fehler im Endverschluss aufzeigte, ist diese Prüfung sehr erfolgreich verlaufen. Die Nachprüfung mit derselben Einrichtung er-



Figur 6 Koeberg, Südafrika

SF₆-Rohrgasleitung, 400 m, Prüfspannung 430 kV, 15 min
Prüfeinrichtung auf dem Flachdach des Schaltanlagegebäudes

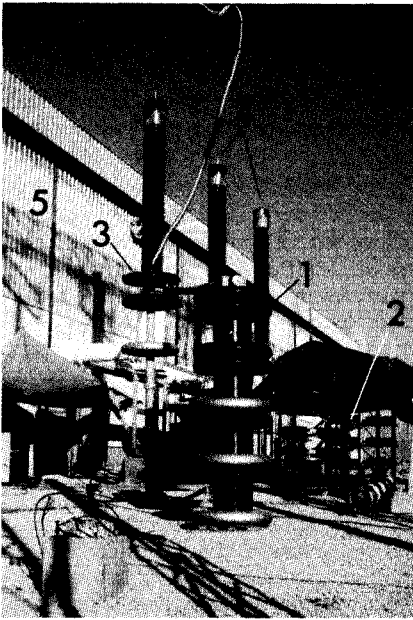
- 1 Umrichter wie Fig. 5
- 2 Einphasen-Öltransformator 9 kV zur Einspeisung in Spulen wie in Fig. 5
- 3 kapazitiver Spannungsteiler für die Spannungsmessung
- 4 Freileitungseinführung vom Dach aus



Figur 7 Vaihingen/Enz, Süddeutschland

Kabel 1,5 km Länge
Prüfspannung 230 kV, 1 min, 90 Hz
Leistung 7,5 MVA, 50 kW

- 1 Hochleistungsreaktoren, parallel $n = 3$
- 2 kapazitiver Spannungsteiler als Stützer
- 3 Kabelendverschlüsse



Figur 8 Resonanzanlage (Vordergrund) und Stossanlage im geöffneten Zelt vor dem Gebäude der 420-kV-Schaltanlage in Riyadh Süd, Saudiarabien

Diverse Anlagekapazitäten bis 20 nF
Wechselspannung 416 kV, 1 min
Stossspannung schwingend 840 kV

- 1 Drosselspulen wie Fig. 5
- 2 Stossgenerator 50 kJ
- 3 Messspannungsteiler 750 pF
- 4 Freileitungseinführungen
- 5 Schaltanlagegebäude

forderte nur einen Tag mit Anreise, Aufstellen, Abbrechen und Einpacken.

In den Jahren 1985/86 war die FKH für einen europäischen Hersteller an mehreren Orten in Saudiarabien unter schwierigen Bedingungen tätig. Es wurden Wechselspannungsprüfungen, Stossprüfungen und TE-Messungen verlangt. Stossprüfungen wurden in Riyadh zusätzlich verlangt, weil das IEC-Draft des Komitees 17C, welches die Regel 517 vorbereitete, noch nicht ratifiziert war. Der Transport des mobilen Kompakt-Stossgenerators der

Festgestellte Ursache	relativ oft	relativ selten	nur einmal
Abrieb und Späne aus Metall	X		
Abrieb und Fasern aus Kunststoff	X		
Schmutzpartikel, Sand, Staub	X		
kleine Fremdkörper, z. B. Schrauben, Drahtstücke, Schweissperlen		X	
grosser Fremdkörper, z. B. Werkzeug			X
fehlerhafte Montage		X	
Transportschäden, meist defekte oder fehlerhafte Isolatoren	X		

Tabelle I Häufigkeit von aufgetretenen Überschlägen

FKH erfolgte mit Flugzeug. Im südlichen Bergland (Grenznähe zu Jemen) wurde an einigen kleineren Schaltstationen 132 kV zusätzlich zur Prüfspannung mit Wechselstrom auch Teilladungsmessung verlangt, für die der Thyristorumrichter nicht geeignet ist. Dort wurde ein Prüftransformator 350 kVA eingesetzt. Die Anlage musste mit einem Lastenzug mit über 30 t Nutzlast, verteilt auf zwei Lastwagen und einen Tieflader, durch teilweise unwegsames Bergland von Kuwait herangeschafft werden. Auf den verschiedenen Baustellen stand meistens keine Netzstromversorgung zur Verfügung, so dass das Prüfschema von Figur 1a eigentlich sinnigermäss zu ergänzen ist mit: Notstrom-Dieselgenerator, Eingangstransformator, Umrichter und Ausgangstransformator. Die ganze Speisekette ist heute im FKH-Generatoraggregat von Figur 1c integriert. Das gesamte Testmaterial von Saudiarabien (Stossanlage und Prototyp-Resonanzanlage) konnte nach 2jährigem hartem Einsatz funktionsfähig in die Schweiz zurückgenommen werden.

Dass die Vor-Ort-Prüfung von grosser Bedeutung ist, zeigen die Resultate. In bezug auf die geprüften Objekte wurde die Erfahrung gemacht, dass kaum eine 400-kV-Anlage existiert, bei welcher während der Prüfungen nicht mindestens ein Überschlag aufgetreten ist. Soweit feststellbar, sind die Ursachen mannigfaltig (Tabelle I).

Obwohl man anstrebt bzw. anstreben sollte, die Stelle eines Überschlages zu lokalisieren, um mögliche Ursachen beheben zu können, ist dies leider gelegentlich nicht gelungen. Spätere Leistungsüberschläge mit den bekannten Folgen sind dann nicht mit Sicherheit auszuschliessen.

Ganz generell sollten Spannungswandler und in die Anlage eingeführte Kabel als zum System gehörig betrachtet und mitgeprüft werden. Das Prinzip, dass die Gasräume nach erfolgter Prüfung nicht mehr geöffnet werden dürfen, lässt sich nur wirklich einhalten, wenn die Testeinrichtung über die Kabel oder über Freileitungsisolatoren von aussen her angeschlossen werden kann.

Literatur

- [1] F. Bernasconi, W.S. Zaengl und K. Vonwiller: A new HV-series resonant circuit for dielectric tests. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, 28... 31 August 1979; report No. 43.02.
- [2] W. Zaengl e.a.: Connaissances acquises par des essais de tension alternative de fréquence variable à l'aide d'un dispositif de résonance en série de poids réduit pour mesures à effectuer sur les lieux d'utilisation. Rapport CIGRE No 23-07, 1982.
- [3] M. Zwicky: Zur Isolierfestigkeit von Schwefelhexafluorid (SF₆) bei Wechselspannung. Dissertation der ETH Nr. 8148, Zürich, 1986.
- [4] Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse de tension assignée égale ou supérieure à 72,5 kV. Deuxième édition. Publication de la CEI 517, 1986.