Hochleistungs-Resonanzanlage für die Wechselspannungs-Isolationsprüfung an Kabeln mit einer Betriebsspannung über 110 kV

Autor(en): **Gerlach, H. G.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **79 (1988)**

Heft 23

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904117

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Hochleistungs-Resonanzanlage für die Wechselspannungs-Isolationsprüfung an Kabeln mit einer Betriebsspannung über 110 kV

H.G. Gerlach

Die FKH hat ein Resonanzsystem entwickelt, welches erstmals ermöglicht, auch grössere Kabelanlagen mit Wechselspannung statt wie bisher üblich mit Gleichspannung zu prüfen. Das aus Dieselmotor, Asynchrongenerator und Stufentransformator (DAT) zusammengesetzte Maschinenkonzept (Speisung) unterscheidet sich wesentlich von allen bisher bekannten Wechselstromgeneratoren. Neben einer technischen Beschreibung des DAT-Generators wird die Wirtschaftlichkeit hochausgenutzter Resonanzsysteme beleuchtet, die in der Wechselspannungsprüftechnik und insbesondere bei der Kabelprüfung von Interesse sind.

La FKH a développé un système de résonance qui permet, pour la première fois, de tester de grandes installations de câbles au moyen de tension alternative au lieu de tension continue. Le groupe machines composé d'un moteur Diesel, d'un alternateur asynchrone et d'un transformateur à gradins (DAT) se distingue considérablement de tous les alternateurs connus à ce jour. Outre une description technique de l'alternateur DAT on étudie ici la rentabilité des systèmes de résonance à utilisation intense, qui sont d'un intérêt particulier pour les essais sous tension alternative, en particulier pour les essais de câbles.

Adresse des Autors

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

1. Einleitung

Die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) führt Isolationsprüfungen an Hochspannungssystemen durch, vor allem in den Anlagen der Elektrizitätswerke. Sie ist dafür mit verschiedenen mobilen Einrichtungen ausgerüstet, die sie zum Teil selbst entwickelt hat [1;2]. Isolationsprüfungen an verlegten Kabelstrecken wurden bisher nur mit Gleichstrom durchgeführt, weil geeignete Wechselstromausrüstungen nicht zur Verfügung standen. Diese Prüfung ist aber kaum aussagefähig (eventuell sogar schädlich), und zwar besonders bei den heute meist verwendeten Kunststoffdielektrika [3]. Die FKH hat in verschiedenen Pilotprüfeinsätzen bereits erfolgreiche Wechselspannungsprüfungen an Kabeln durchgeführt [1].

Die Problematik der nicht betriebskonformen Spannungsprüfung besteht auch in der Mittelspannungsebene bis 24 kV, doch geht dort die Entwicklung in Richtung von Kleinprüfgeräten, welche die Elektrizitätswerke entsprechend dem rasch wechselnden Betriebsgeschehen selbst betreiben sollten [4]. Es muss mit einer grossen Zahl von Prüfeinsätzen an kürzeren Kabellängen von bis 2 km bei einer Prüfspannung von höchstens 50 kV gerechnet werden, was zu reaktiven Leistungsumsätzen von maximal 500 kVA führt. Im Hochspannungsnetz über 110 kV Betriebsspannung ist dagegen mit Kabellängen bis 5 km (oder mehr) und mit einer Prüfspannung bis 230 kV zu rechnen, was Leistungsumsätze über 20 MVA erwarten lässt.

Das Problem der Leistungsbereitstellung lässt sich heute mit parallelgeschalteten Spulen und mit geeigneten Frequenzregelquellen nach dem Resonanzprinzip lösen, wobei der Aufwand im wesentlichen gewichtsproportional ist. Wenn man von anderen wirtschaftlichen Faktoren wie beispielsweise der schwer voraussehbaren Materialbenutzungsdauer oder der relativ kurzen Personaleinsatzzeit absieht, so hängt die Wirtschaftlichkeit der Spannungsprüfeinrichtungen vor allem vom Anschaffungswert ab. Obwohl darin auch wesentliche Personalkosten (Entwicklung) enthalten sind, kann man für alle schweren Leistungsträger (z.B. Reaktoren, Maschinen, Kondensatoren) als grobe Richtvorstellung von einem einheitlichen Preisansatz pro Gewichtseinheit ausgehen. Die Nebenkosten der Prüfung für Transporte und Versicherung sind ebenfalls gewichtsproportional. Diese einfache Regel gilt allerdings nur für neuwertiges, spezifisch leichtes Prüfmaterial.

Die FKH setzt verschiedene Resonanzeinrichtungen je nach Verwendungszweck ein. In der vorliegenden Arbeit soll über die maschinengespeiste Resonanzschaltung für Prüfungen an Hochspannungskabeln berichtet werden. Diese Einrichtung mit einem Gesamtgewicht von nur 8 t (0,35 kg/kVA) leistet kurzzeitig 23 MVA und ist vollständig netzunabhängig.

2. Prüfschaltungen

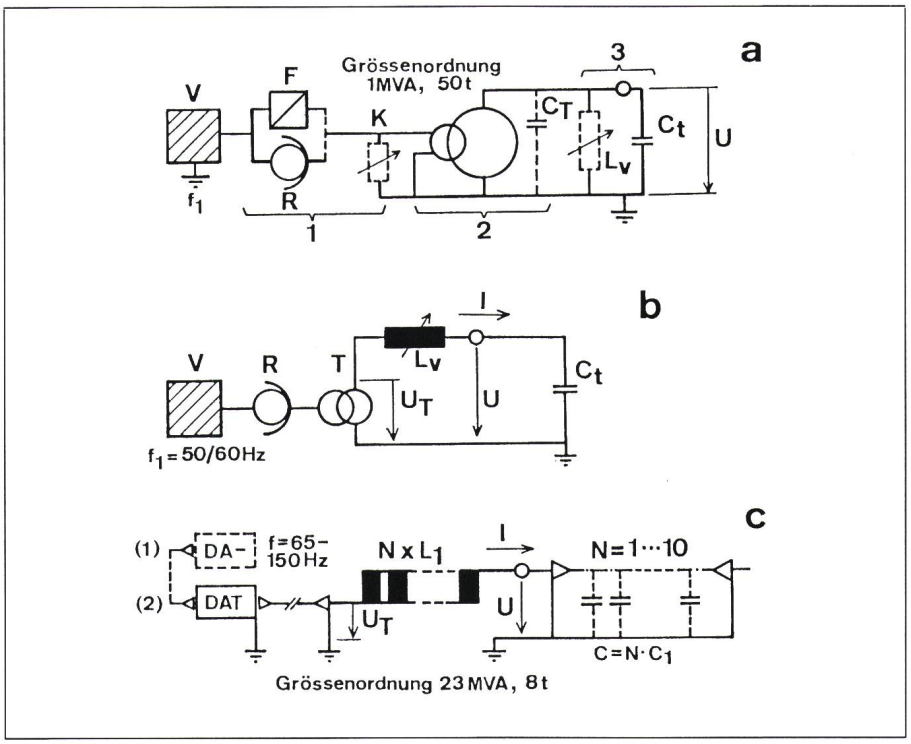
Der Einsatz von Maschinen für die Hochspannungsmesstechnik ist nicht neu, denn schon in der weit verbreiteten konventionellen Ausstattung grosser Prüflaboratorien (Fig. 1a) findet man die mit Maschinensätzen (1) zur Spannungsregelung (R) oder zur Frequenzumformung (F) ausgerüstete ortsfeste Infrastruktur. Man spricht meist nicht von Resonanz, obwohl üblicherweise Kompensationsmittel zur Leistungssteigerung eingesetzt werden. Eine Primärkompensations-

spule (K) entlastet nur die Stromquellen, nicht aber den teuren und wenig effizienten Prüftransformator (2), während eine schwergewichtige Hochspannungsverstelldrossel (L_v) auch zur Aufwertung des Transformators beiträgt.

Die Schaltungen von Figur 1a und 1b betreffen Parallel- bzw. Serienresonanz mit fester Frequenz $f_1 = 50$ bzw. 60 Hz. Parallelresonanz (3) liegt vor bei Spannungsspeisung (U in 1a), wobei der induktive Zweigstrom im Drosselpfad (L_v) die kapazitiven Lastströme ($C_T + C_t$) nur annähernd kompensieren muss. Da die einzuhaltende Prüfspannung U am Transformator ansteht, wird ein genauerer Abgleich als bis auf Stromsumme 10% meistens nicht angestrebt. Mit der Stromeinspeisung der Serienresonanzschaltung dagegen (I in 1b) verwendet man einen viel kleineren Transformator (T), in der Absicht, den hohen Gütefaktor des Hochspannungskreises $Q = U/U_T \approx 100$ möglichst vollständig zu nutzen. Dies erfordert eine wesentlich subtilere Abstimmung und begründet gleichzeitig den Schaltungsvorteil des Reihen- gegenüber dem Parallelresonanzkreis (Wegfall des Transformators 2).

Eine verstellbare Drosselspule ist allerdings sehr gross und schwer, jedenfalls für mobilen Einsatz nicht geeignet. Weitere Gewichts- und Kostenvorteile können durch das Zugeständnis einer variablen Frequenz erkauft werden, wenn man die verstellbare Spule L_v und das Netz V gemäss Fig. 1c durch eine andere Spulenanordnung mit Frequenzregelquelle ersetzt. Obwohl der zur Kreisabstimmung notwendige Frequenzspielraum f viel enger begrenzt werden kann, als man sich ursprünglich vorgestellt hatte [1], wirkt sich die Frequenzabstimmung in dreifacher Hinsicht kostengünstig aus:

- Die Frequenzabstimmung lässt sich viel genauer ausführen, und gegebene Gütefaktoren lassen sich besser ausnutzen als mit einer Luftspaltverstellung an der Drosselspule.
- Die Aufteilung der reaktiven Leistung in transportgünstige kleinere Einheiten ermöglicht eine Stabkernkonstruktion mit grossem magnetischem Luftfeldanteil. Das Eisen darf hierbei gesättigt sein, und es sind hohe spezifische Beanspruchungen möglich (elektrisch, magnetisch und thermisch).
- Die Reaktorbatterieschaltung hat den Vorteil eines proportionalen Materialeinsatzes bezüglich Spulen und Stromquellen, je nach Prüffall und Kabellänge. (Die Parallelschaltung mehrerer Regelquellen ist nur bei netzunabhängigen Aggregaten sinnvoll.)



Figur 1 Betriebsmittel und Schaltungen

a	Beispiel einer stationären Laborausrüstung mit kompensiertem Prüftransformator, Parallelresonanz spannungsgespeist (U) Die Hochspannungskompensation mit Spule L_v ist nicht üblich ausser bei einigen Herstellern von Objekten mit grosser Kapazität C_t
b	Netzgespeister Serienresonanzkreis, Stromeinspeisung (I) mit fester Frequenz
c	Reaktorbatterieschaltung der FKH für die Prüfung längerer Kabelstrecken über 110 kV Betriebsspannung
V	Stromversorgung aus dem Netz mit ortsfester Installation
R	Induktionsregler, Thomaregler oder Synchron-Synchron-Umformer
F	Frequenzumformergruppen 50/60 und 50/150 Hz
T	Mittelspannungstransformator 10–20 kV
1	Maschinenraum
2	Hochspannungs-Prüftransformator min. 600 kV, 1 MVA
3	Parallelresonanzkreis fester Frequenz
K	induktive Primärkompensationsspule
L_v	Hochspannungsspule mit verstellbarem Luftspalt
C_T	Wicklungskapazität des Transformators
C_t	Kapazität des Testobjekts
L_1	Hochleistungsreaktor 50 H, 250 kV, 10 A
C_1	Lastkapazität je Reaktorspule entsprechend etwa max. 500 m Kabel bei 230 kV bzw. 2000 m bei 115 kV
N	Zahl der eingesetzten Reaktoren L_1 (bis max. 10)
U	Prüfspannung max. 230 kV, 1 min
I	Ladestrom max. 100 A
U_T	Transformatorspannung maximal 2,5 kV (umschaltbar)
DAT	Frequenzregelquelle bestehend aus Dieselmotor, Asynchrongenerator und Stufentransformator (2), Twin-Set ab N>5 mit Hintermaschine DA-(1), Prototyp

3. Reaktorleistungen und Frequenzregelbereiche

Die koordinierte Wechselspannungsprüfung für Betriebsmittel der Verteilspannungsebene 110 kV (Reihenspannung $U_m = 123$ kV) beträgt

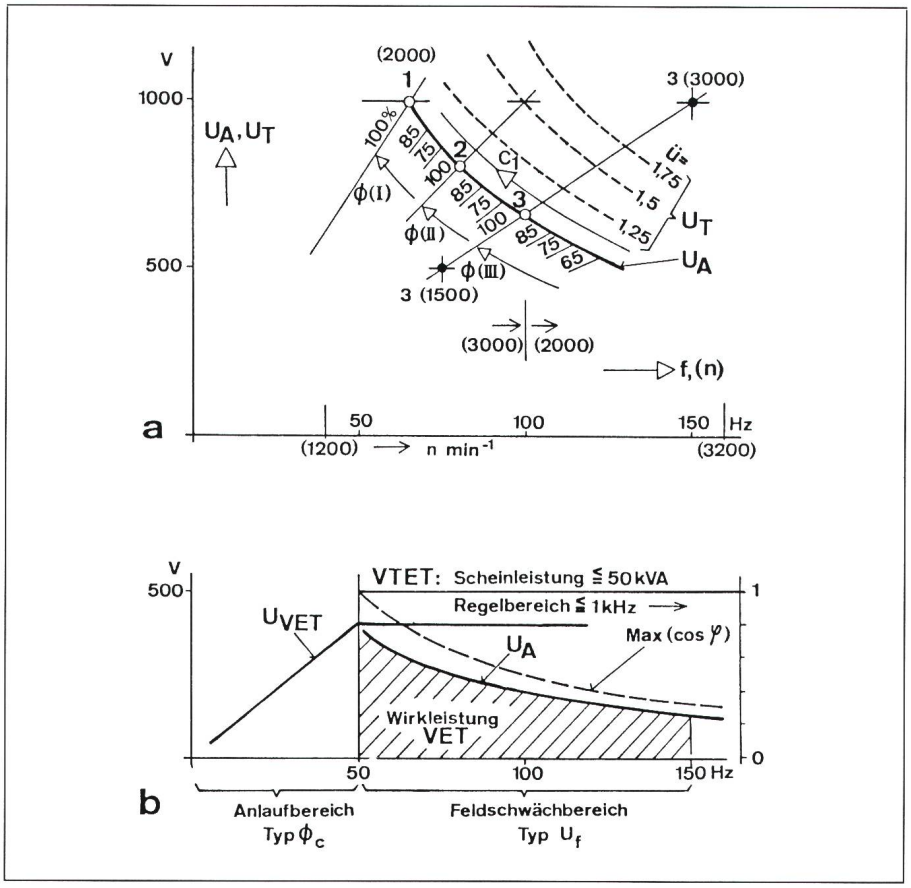
230 kV, 1 min, entsprechend dem Stossspannungsniveau 550 kV. Dies ist die höchste Prüfspannung, die für einen grossen Teil der Kabelanlagen in Frage kommt. Die Spulen L_l in Figur 1c sind für eine höchste Spannung von 260 kV und für einen höchsten Strom von 11 A ausgelegt (Effektivwert). Infolge von Eisensättigung werden die Reaktoren magnetisch vollständig ausgenutzt, während die thermische Beanspruchung durch die überwiegenden Stromwärmeverluste (etwa 15 kW pro Spule bei 10 A) eine Prüfdauer von dreimal 1 min je Tag zulässt, ausreichend für drei Kabelphasen am selben Tag.

Wegen des hohen Luftfeldanteils hat die Nichtlinearität der Spule nur einen mässigen Einfluss auf die Sinusform von Prüfspannung (U) und Ladestrom (I). Trotzdem ist die bekannte Thomson-Formel strenggenommen nicht mehr anwendbar. Anstelle von $2\pi f_0 = (L_l C_l)^{-1/2}$ tritt eine formal ähnliche Bestimmungsgleichung, in welcher die sättigungsabhängige Ersatzinduktivität $L_s = L_s(I/N)$, kleiner als die ungesättigte Induktivität L_l, einzusetzen ist:

$$L_s \leqq L_l,\ 2\pi f_s = [L_s(I/N)\cdot C/N]^{-1/2} > 2\pi f_0$$

Ein gewisser Frequenzhub (f_s–f_0) bewirkt nicht etwa eine Vergrösserung des notwendigen Frequenzarbeitsbereichs, sondern im Gegenteil eine Kompression in der Frequenzbereichsmitte. Weitere Untersuchungsergebnisse über den nichtlinearen Resonanzkreis müssen einem späteren Bericht vorbehalten bleiben.

In dem von der Maschine gegebenen Drehzahlbereich zwischen 1200 und 3200 min^{-1} (Fig. 2a) sind mittels Polumschaltung am Generator Frequenzen im Verhältnis 1:4 (40...160 Hz) möglich. Unter Last reduziert sich der Arbeitsbereich auf etwa 1:3 (50...150 Hz), wobei auch die verlangte Spannungshöhe auf die Frequenz Einfluss nimmt. Betrachtet man $U_{max} = 230$ kV als Höchstmass für 1-min-Prüfungen und einstufige Reaktorschaltungen (ohne Reihenschaltung), so ergibt sich eine Belastung mit vollem Spulenstrom bei $f = 90...100$ Hz. Hält man vorläufig den Spulenstrom und die Lastkapazität konstant, so geht die Frequenz (konstanter Fluss) proportional zur Spannung zurück, wenn die Zahl paralleler Spulen N proportional zum Spannungsquadrat reduziert wird, z.B.:



Figur 2 Spannungscharakteristiken U(f), Resonanzlastanpassung der Stromquellen

a	DAT-Generator mit aufgebautem Transformator bis $ü = 5$ für Prüfspannungen bis 1000 kV ($ü = 2{,}5$ bis 250 kV)
b	Elektronische Umrichter mit festem Ausgangstransformator
VTET	FKH-Umrichterentwicklung 1980 [1]
VET	Motorumrichter mit Transformator $ü = 2{,}5$ für Prüfspannungen bis max. 50 kV
U_A	Lastcharakteristik vor dem Transformator ($ü = 1$)
U_{VET}	Umrichterspannung vor dem Transformator
U_T	DAT-Ausgangsspannung
$ü$	Schaltstufen am Transformator (T3, T4 in Fig. 4)
1–3	Schaltstufen am Generator:
	– *Wicklung:*
1	4polig Y-Schaltung (p = 2)
2	4polig Δ-Schaltung
3	6polig Δ-Schaltung (p = 3)
	– *Erregertransformatoren* (Fig. 4)
1	T1, T2 in Reihe
2,3	T1, T2 parallel
	– *Kondensatorbatterie* in Gruppen von 2×150 µF (2×C/3, Fig. 4)
1,2	3 Gruppen passend zu p = 2
3	2 Gruppen passend zu p = 3
I–III	Flussregelbereich zu Schaltstufen 1–3
C_l	Lastkapazität 10:1 bei vollem Frequenzregelbereich 1:2 (65–130 Hz) und bei unteilbarer Spulenzahl $1 \times L_l$

$U/U_{max} = 1/2$; I/N = const.; C = const.

f/f_{max}	$= U/U_{max}$	$= 1/2$
N/N_{max}	$= (U/U_{max})^2$	$= 1/4$
Mindestfrequenz bei $U_{max}/2$	$f = f_{min}$	= 50 Hz
Phasenstreckenlänge des Kabels je Spule C_{lmax} etwa 4·500		= 2000 m
Wirkleistung relativ, proportional $N \sim U^2$		$= 1/4$
Scheinleistung relativ, prop. $N \times U \sim U^3$		$= 1/8$
Güte = Scheinleistung/Wirkleistung $\sim f$		$= 1/2$

Eine Mindestspannung $U_{max}/2$ kann auf einem niederen Koordinationsniveau bei ebenfalls kurzer Prüfdauer 1 min verlangt werden (z.B. Reihe 72,5 kV), mit der Konsequenz einer grossen Phasenstreckenlänge (2000 m). Wird aber die Spannung bei unveränderter Prüfschaltung reduziert (500 m/Spule), so gehen die Strombelastung der Spule und die Spulenverluste zurück:

$U/U_{max} = 1/2$; N = const.; C = const.	
I/I_{max}	$< U/U_{max}$
$(I/I_{max})^2$	$< (U/U_{max})^2$
Frequenz	$f \approx 100$ Hz $< f_0 < f_s$
Verlustleistung relativ	$< 1/4$
Mögliche Prüfzeit relativ (bei voller Ausnützung der Wärmekapazität)	$> 4/1$

Der Modus Prüfspannung = maximale verkettete Systemspannung gegen Erde U_m = 123 kV, 5 min entspricht einer IEC-Normenerwägung (Draft 1984), die zur gleichen thermischen Spulenausnutzung führt wie die nicht genormte Prüfung mit voller Koordinationsspannung 230 kV, 1 min. Andere Normvorstellungen, beispielsweise $U_m \cdot 2/\sqrt{3}$, 15 min nach BEWAG, erfordern eine angemessene Reduktion der Phasenstreckenlänge bzw. einen entsprechend grösseren Spuleneinsatz (N grösser).

Wenn sich nicht die Spannung, sondern die Kapazität ändern soll, so sei zunächst von einer kleinsten Kabellänge 200 m ($\triangleq C_{1min}$) zusammen mit einer einzigen Spule (L_1) bei einer höchsten Resonanzfrequenz f = 130 Hz ausgegangen. Die Kapazität C_1 kann steigen bis zu einem Maximum entsprechend der sogenannten Phasenstreckenlänge bei f = 65 Hz, in Höhe von etwa 1000 m bei einer mittleren Prüfspannung $U \approx 160$ kV bzw. sogar von 2000 m bei minimaler Prüfspannung $U_{max}/2$ = 115 kV und bei minimaler Frequenz f_{min} = 50 Hz. Die grösstmögliche Kapazitätsreichweite einer Spule (200...2000 m Kabel) ergibt sich mit Ausnutzung des vollen Frequenzspielraums nach unten 130...50 Hz aus

$$C_{1max}(50\text{ Hz}) \triangleq$$

$$\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{130}{50}\right)^2 \cdot 200 \approx 2000\text{ m}$$

einschliesslich eines 1/3-Zuschlages durch willkommenen Einfluss der Sättigung. Wenn man an der oberen Frequenzgrenze 130 Hz auch noch von der Möglichkeit Gebrauch macht, drei Kabelphasen parallel zu schalten, so erhöht sich der Arbeitsbereich C_1, ausgedrückt in Phasenlängen mit einheitlichem Kapazitätsbelag, auf 15:1 im engeren Frequenzregelbereich 1:2 (bis 65 Hz) bzw. auf 30:1 (bis 50 Hz).

Erst wenn die zu prüfende Kabellänge eine im voraus bekannte maximale Streckenlänge (C_{1max}) übersteigt, wird Parallelschaltung mit mehr als einer Spule angewendet. Im Übergang von N = 1 auf N = 2 Spulen springt die Resonanzfrequenz um einen Faktor $< \sqrt{2}$ von annähernd 65 auf 90 Hz (C_{1max} = const.). In dem Mass, wie Kapazität C und Kabellänge weitersteigen, senkt sich die Frequenz erneut gegen den angenommenen unteren Grenzwert 65 Hz, während sich die Kabellänge dem Betrag von genau zwei Phasenstreckenlängen nähert (2000 m), und so weiter. Die Stufensprünge hängen aber von der Spannung ab, sie betragen ungefähr 500–1000–2000 m bei Prüfspannungen 230–160–115 kV.

Der Arbeitsbereich der Frequenzen (50...150 Hz in Fig. 2a) kann in Unterbereiche von je 2:3 eingeteilt werden:

1. Anlaufbereich 45...65 Hz. Spulenstrom konstant auf hohem Sättigungsniveau, Spannung und Leistung linear steigend. Dieser Bereich hat nur für grosse Streckenlängen auf reduziertem Spannungsniveau Bedeutung.
2. Schwachlastbereich 100...150 Hz. Die Stromaufnahme sinkt bei gleichzeitig steigender Frequenz, während die Spannung konstant gehalten wird. Bei ungesättigtem Reaktor ändern sich der Strom I und die Wechselstromperiodenlänge $T = 1/f$ proportional gemäss

$$I/U = (C/L)^{1/2} \sim 1/(2\pi f) = (C \cdot L)^{1/2}$$

$$\triangle I/I = \triangle T/T = 1/2\, \triangle C/C$$

3. Übergangsbereich 65...100 Hz. Dieser Bereich verlängert den Anlaufbereich (1) nach oben, wenn höhere Spannungen bis U_{max} verlangt werden, und gleichzeitig den Schwachlastbereich (2) nach unten, wenn grosse Kabellängen je Spule zum Einsatz kommen, wobei immer an der unteren Bereichsgrenze Sättigung auftritt. Im Sättigungszustand gilt

$$\triangle I > \triangle C/2 \text{ und } \triangle T < \triangle C/2 \text{ in p.u.}$$

Die Frequenzachse ist im wichtigsten Teil des Regelbereichs (65–100 Hz) durch Sättigungseinfluss stark komprimiert.

4. Spannungsanforderungen der Resonanzlast und Charakteristiken der Regelquellen

Angenommen, es sei eine Einheitsspannung $U = U_1$ = 100 kV an verschiedene Kabel unterschiedlicher Länge anzulegen. Mit nur einem Reaktor L_1 werde ein Frequenzregelbereich 1:2 durchfahren, der sich mit variablen Kapazitäten C_1 ergibt (Fig. 2a). Die am Eingang des Reaktors geforderte Spannung $U_T = U_A$ ($\ddot{u}$=1) steigt nach einer Hyperbel (2:1) wegen der von Spulenstromverlusten $R_1 I^2$ wesentlich bestimmten Kreisgüte:

$$Q = 2\pi f \cdot L_1/R_1;$$
$$U_A = U_1/Q \sim 1/f$$

Erfahrungsgemäss wird eine Güte Q = 100 bei f = 65 Hz erreicht, somit braucht eine angepasste Stromquelle mit der Charakteristik

$$U_A(f) = 1000\text{ V} \cdot 65\text{ Hz}/f$$

keine andere Spannungsregeleinrichtung als nur die variable Frequenz aufzuweisen. Wenn Last- und Quellenspannung deckungsgleich übereinstimmen, liefert eine derartige transformatorlose Stromquelle nur Wirkleistung.

Wechselstromgeneratoren einfacher Bauart, die neben einer Statorwicklung mit Polpaarzahl p einen passenden Feldmagneten mit konstantem Fluss Φ aufweisen (beispielsweise ein asynchrones Drehfeld mit geringem Schlupf $s \leqq 2\%$ oder ein Permanentmagnet s = 0), liefern etwa drehzahlproportionale Frequenz und Spannung:

$$f = n \cdot p/(1+s); \quad U \sim \Phi \cdot n = \Phi \cdot f/p$$

Die Schnittpunkte 1–2–3 in Figur 2a sind verschiedenen geradlinigen Kennlinien für je eine Wicklungsschaltung zugeordnet; ohne Umschaltung könnte die Lastcharakteristik $U_A(f)$ nur in einem einzigen Punkt erfüllt werden. Erst eine Kombination von Fluss- und Schaltungsänderungen vermag die Spannungsanforderung nahtlos zu befriedigen. Je eine Frequenzumschaltung (Polzahlverhältnis $2/3 \approx 0{,}65$) und Spannungsumschaltung $\triangle/Y$ ($1/\sqrt{3} \approx 0{,}9 \cdot 0{,}65$) führt auf ein kleinstmögliches Regelverhältnis der spannungsbestimmenden Faktoren

2:3, sowohl beim Fluss Φ(65...100%) als auch bei der Drehzahl n (2000...3000 min^{-1}).

Werden höhere Spannungen als die angenommene Einheitsprüfspannung U_1 verlangt, so kann dem im DAT-System mit umschaltbarer Transformatorübersetzung $\ddot{u} = U_T / U_A$ Rechnung getragen werden. Die Spannungsanforderung des Resonanzkreises vor dem Reaktor U_T ist demnach durch eine Hyperbelschar mit Parameter $\ddot{u}$ = const. darzustellen. Das Spannungsvermögen des umschaltbaren Generators steigt ohne Transformator mit der Frequenz 65...150 Hz von 100 kV in Punkt 1, n= 2000 min^{-1}, bis 230 kV in Punkt 3 (n = 3000) oder bei konstanter minimaler Frequenz mit den Übersetzungsstufen des Transformators

$\ddot{u}$ = 1-1,25...2,5

bis maximal 250 kV, 65 Hz (Anpassungsbereich für Kabelprüfungen). Darüber hinaus können mit höheren Übersetzungsverhältnissen

$\ddot{u}$ = 3...5

auch Höchstspannungsversuche an Schaltanlagen durchgeführt werden. Beispielsweise erzielt man mit 4 Reaktoren in Reihe zu je 250 kV bei 150 Hz:

$Q \geqq 200$, $\ddot{u} = 5$, $U_A = 1000$ V,
$U \geqq 200 \cdot 5 \cdot 1 = 1000$ kV

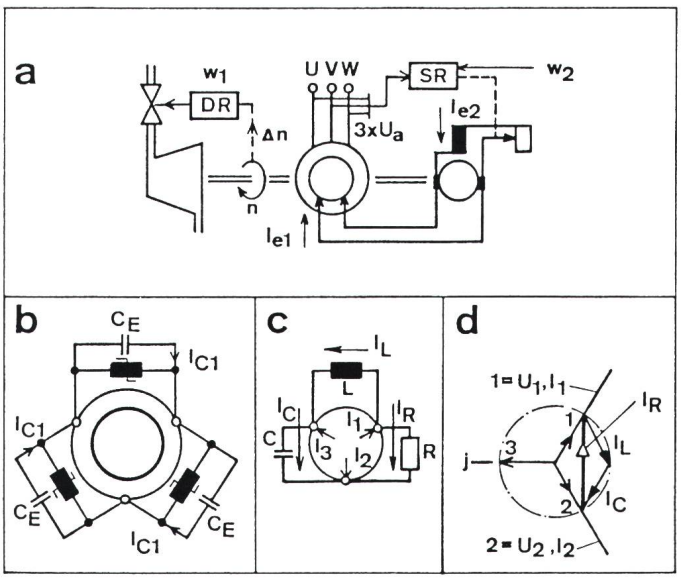
Die Forderung nach einer geringen Drehzahlregelspanne muss auch wegen der antreibenden Kolbenkraftmaschine erhoben werden, deren Leistungsabgabe mit sinkender Drehzahl grundsätzlich abfällt. Die Kombination der verschiedenen Anforderungen führt auf eine 4-/6polig umschaltbare Generatorwicklung mit Schaltstufen 1-2-3 und Flussregelbereichen I-II-III nach Figur 2a. Mit einem mechanischen Regelgetriebe [1] könnte man zwar die Leistung der Primärmaschine noch etwas besser ausnutzen (n = const.), aber ein Generator ohne Umschaltungen wäre dennoch fehlangepasst, entsprechend einem Spannungs- und Leistungsabfall auf der 6poligen Generatorkennlinie von 3(3000) bis 3(1500).

Als eine wirtschaftliche Alternative kommen elektronische Frequenzumrichter in Frage, vor allem bei kleineren Leistungen, wo man auf marktgängige Produkte zurückgreifen kann, die bereits für Regelantriebe gebaut werden (regelbare Asynchronmotoren am Netz). Je nach Anordnung eines Transformators T vor oder hinter dem Umrichter E sind, ausgehend von der Netzversorgung V, Lösungen der Form VTE, VET oder VTET möglich (Fig. 2b). Der Prototyp der FKH [1] entspricht der Bauform VTET.

Bei den Motorumrichtern VET kann man einen Anlaufbereich mit konstantem Motorfluss (Φ_c) und einen Feldschwächbereich (U_f) unterscheiden. Der Anlaufbereich kann nicht genutzt werden, und der Feldschwächbereich erzeugt innerhalb der eigentlichen Frequenzregelspanne 50...150 Hz automatisch Blindleistung (Max(cosphi) in Fig. 2b). Bei ungeregelter konstanter Ausgangsspannung U_{VET} wird die Blindleistung durch Phasenverschiebung von Strom und Spannung im Resonanzkreis hervorgerufen [1]. Elektronische Spannungsregelung (Spannungssenkung) U_A erzeugt statt dessen entweder Phasenanschnitt-Blindlast am netzseitigen Eingang oder Oberwellen-Blindleistung an den Ausgangsklemmen.

Figur 3
Konventionelle Generatoren

a Synchrongenerator für Stromlieferung ins Netz mit aufgebautem Gleichstrom-Erregergenerator und mit zwei Reglern (DR = Drehzahlregler, SR = Spannungsregler)
b Selbstregelnder Asynchrongenerator für Notstrombetrieb, mit Kurzschlussläufer und statisch-kapazitiver Erregung, nur ein Drehzahlregler
c Schaltung zur Steinmetzsymmetrierung mit Zählpfeilen
d Zeigerdiagramm zu c



5. Konventionelle Generatoren

Die üblichen Drehstromgeneratoren (Figur 3) sind für den Betrieb bei Netzfrequenz ausgelegt und lassen meistens nur geringfügige Drehzahlabweichungen zu ($\triangle n$ in p.u.). Synchrongeneratoren (Fig. 3a) haben im allgemeinen Schleifringe, über die der Erregerstrom I_{e1} von einer Gleichstromerregermaschine zugeführt wird, die ihrerseits mit Hilfe eines weiteren Felderregerstroms I_{e2} gesteuert wird. Diese Maschinen verfügen über zwei unabhängige Regler DR, SR. Am Netz laufend, wird mit den Reglerführungsgrössen w_1, w_2 die Wirk- bzw. die Blindleistung verstellt. Ohne das Netz wirken die Regler einzeln auf Drehzahl und Spannung. Die Zweikreisregelung ist aber im Inselbetrieb (ohne das Netz) nicht unbeschränkt stabil.

Für Notstromaufgaben werden selbstregelnde Generatoren gebaut, die im allgemeinen nur einen Drehzahlregler aufweisen. Sie können entweder als kompoundierte Synchronmaschinen oder als selbsterregte Asynchrongeneratoren nach Figur 3b ausgeführt sein. Der Asynchrongenerator weist einen Kurzschlusskäfigläufer und eine statische Erregereinrichtung mit Kondensatoren und Sättigungsdrosselspulen auf (nichtlinearer Parallelresonanzkreis, $\triangle U_a$ = 2...3 $\times \triangle n$). Es ist bekannt, dass solche Maschinen bei Leistungen unter 300 kVA billiger als gleichwertige Synchronmaschinen zu stehen kommen und ausserdem dank dem symmetrischen Kurzschlusskäfig über eine höhere Schieflastverträglichkeit verfügen (Einphasenstromentnahme). Es ist weiterhin bekannt, dass die Einphasen-Leistungsfähigkeit durch zusätzlichen Aufwand von reaktiven Kompensationsmitteln weiter gesteigert werden kann [5].

Unter Idealbedingungen gelingt die vollständige Symmetrierung nach Steinmetz (Schaltung 3c, Zeigerdia-

gramm 3d). Wird an ein Drehstromsystem der Phasenfolge 1–2–3 ein ohmscher Lastwiderstand entsprechend der Nennimpedanz je Phase $R = U_1/I_1$ angeschlossen, so nimmt dieser Widerstand an verketteter Spannung $U_{12} = U_1 - U_2$ die 3fache Nennphasenleistung auf, während das System nur mit symmetrischen Wirkströmen I_1, I_2, I_3 belastet ist. Die Kompensationsmittel sind aufeinander in Resonanz und ausserdem mit ihrem Wellenwiderstand an den Lastwiderstand angepasst einzustellen, gemäss der nur für eine ganz bestimmte Frequenz f erfüllbaren Symmetrierungsbedingung

$$2\pi \cdot f = (L \cdot C)^{-1/2}$$
$$\sqrt{3}\, R = (L/C)^{1/2}$$

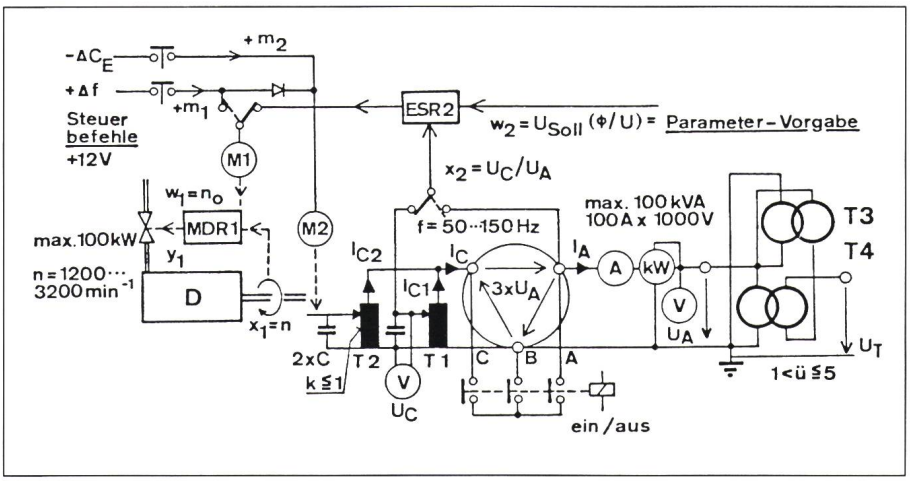
6. Funktionsprinzip des polumschaltbaren Frequenz-Regelgenerators

6.1 Unbeschränkt stabile Frequenzsteuerung

Polumschaltung lässt sich nur bei Asynchronmaschinen mit erträglichem Aufwand realisieren. Nach dem Vorbild der Figuren 3b–3d sollte ein Generator gebaut werden, der die hervorragenden Eigenschaften, welche bis dahin nur bei konstanter Drehzahl bekannt sind, in einem grossen Frequenzregelbereich auszunutzen gestattet. Diese Zielvorstellung konnte dank der Erkenntnis verwirklicht werden, dass sich Steuerungsverhältnisse wie bei einer fremderregten Synchronmaschine ergeben können, wenn vor einer Kondensatorbatterie ($2 \times C$) Stelltransformatoren ($T1$, $T2$) eingesetzt werden, deren Untersetzungsverhältnis k stufenlos mit steigender Drehzahl reduziert wird (Fig. 4). Die Kondensatorspannung U_C, welche ohne diese Stelltransformatoren wie alle Wechselspannungen des Systems U_A mindestens frequenzproportional ansteigen würde, wird in einen kapazitiven Erregerstrom I_C transformiert, der diese Frequenzproportionalität nicht mehr aufweist, wenn die folgende Randbedingung eingehalten wird:

$$k \cdot f = \text{const.};\ U_C = \text{const.}$$

Ersatzmass des Erregerstroms im Generator, analog dem Erregergleichstrom I_{el} in Figur 3a und dem Erregerwechselstrom I_{C1} in Figur 3b, ist die



Figur 4 Vereinfachtes Prinzipschema des DAT-Generators

	direkt angetrieben, kraftstoffgeregelt, umschaltbar
A-B-C	Klemmen der umschaltbaren Dreiphasenwicklung maximal 1000 V/Phase mit Kurzschlussschütz zum Entregen
D	schnellaufender 6-Zylinder-Dieselmotor 100 kW mit Turboaufladung
T1, T2	aufgebaute Erreger-Regeltransformatoren, umschaltbar in Reihe, parallel, oder in V (A-B und C-B)
2×C	Kondensatorbatterie maximal 900 µF, auf die Transformatoren T1, T2 verteilt und erdfrei aufgebaut, in Gruppen umschaltbar
T3, T4	aufgebaute Anpasstransformatoren für Gruppenumschaltungen bis 5 kV
M1, M2	Gleichstromstellmotoren
MDR1	mechanischer Drehzahlregler, P-Regler 1: $w_1 - x_1 = P_1\, y_1$; $P_{1\,min} = 10\%$ Drehmoment ~ Kraftstoffmenge/Hub ~ Stellweg y_1
ESR2	elektronischer Spannungsregler, I-Regler 2: $w_2 - x_2 = P_2\, y_2 \sim dw_1/dt$; $y_2 = 0 \ldots 25$ Vs/s
	Regelkreis-Signalgrössen
m	Handsteuerbefehle zur Impulstastung der Motoren M1, M2
w	Soll-Wert-Reglereinstellung
x	Ist-Wert-Messgrösse (geregelte Grösse)
y	Stellgrösse

Kondensatorspannung U_C in Figur 4.

Zunächst wird bei konstanter Drehzahl (n = const.) eine stark gekrümmte magnetische Regelcharakteristik $\Phi(I_C)$ durchfahren, was im Sinne der Spannungsverminderung mit Hilfe eines Servomotors M2 auf Handimpuls-Steuerbefehl $+m_2$ geschieht. Die auf Klemmenspannung U_A bezogene Ersatzkapazität

$$C_E = k^2 \cdot C$$

werde solange reduziert, bis der Schnittpunkt der Kurve I_C (Φ) mit einer Erregeradmittanzgeraden $I_C \sim \Phi$ schleifend wird, so dass nicht nur die Funktionen von Kurve und Gerade, sondern auch deren Ableitungen gleich sind:

$$I_C(\Phi) = I_C(U_A/f) = 2\pi f^2 \cdot 2\, C_E \cdot U_A/f = 4\pi (kf)^2 C \cdot U_A/f$$

Der schleifende Schnitt stellt die Stabilitätsgrenze der Selbsterregung dar. Unbegrenzt stabil heisst, dass das Auffahren der Drehzahl über einen grösseren Regelbereich nur möglich ist, wenn der Generatorfluss Φ (oder Erregerstrom I_C oder Kondensatorspannung U_C) konstant gehalten wird. Zu dem Zweck werden zwei Steuerschritte $+\Delta f$, $-\Delta C_E$ mit der Randbedingung U_C = const. verknüpft. Andeutungsweise ist in Figur 4 der Steuerbefehl $+m_1$ auf gleichzeitig zwei Servomotoren M1, M2 geführt, welche die Drehzahlsteuerung bzw. die Transformatorverstellung bewirken, entsprechend der gestrichelten Wahlschalterposition für die Handsteuerungsoption.

6.2 Regelungskonzept

Eine Steuereinheit, welche wahlweise auf der Maschine montiert oder mit

längerer Kabelverbindung zwecks Fernsteuerung eingesetzt wird (Fig. 6, Pos. 6), enthält neben den wichtigsten Messinformationen

Hz (f); **V** (U_C); **V** (U_A); **kW** (P_A); **A** (I_A)

eine Reihe von Drucktasten für Steuerbefehle

± C ± F1 ± F2 ± F3; I/O

Ausschalten auf **O** bewirkt eine Schnellentregung durch Kurzschluss und automatische Rückstellung auf minimale Antriebsdrehzahl (Motor-Leerlaufeinstellung). Die in Figur 4 dargestellten Operationen $+m_1$, $+m_2$ entsprechen einer Befehlsgabe bei **+F2** bzw. **−C**. Die Frequenztasten **F1...F3** bezwecken einen steigenden Transformatorverstellgrad:

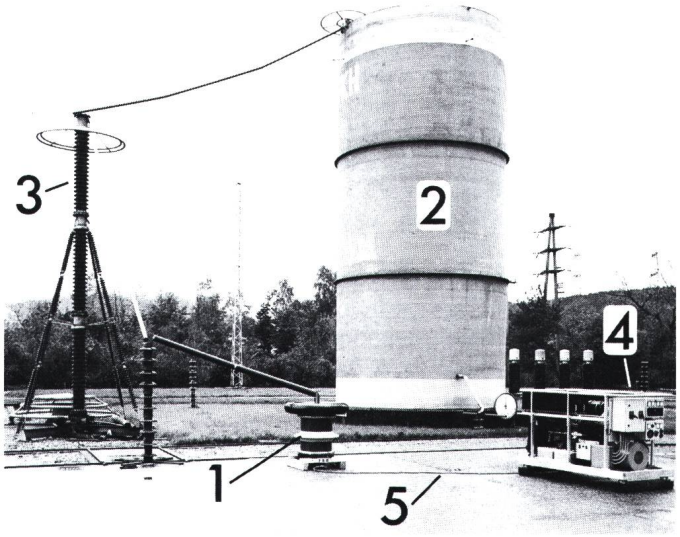
+ F1 = plus $\triangle f$
verbunden mit $-\triangle C_E = 0$
für Fluss-Kompoundierung

+ F2 = plus $\triangle f$
verbunden mit $-\triangle C_E = \triangle f$
für grosse Regelbewegung

+ F3 = plus $\triangle f$
verbunden mit $-\triangle C_E = 2 \cdot \triangle f$
für Feldschwächung

Dreitasten-Steuerbetrieb ermöglicht Korrekturen im Sinne der unbeschränkten Stabilität ($k \sim 1/f$), ohne das Auf- oder Abfahren der Frequenz unterbrechen zu müssen (z.B. Übergang von **F2** auf **F1**, wenn U_C fällt, oder auf **F3**, wenn U_C steigt).

Durch den Einsatz eines Spannungsreglers wird Einknopfsteuerung bei **F2** möglich, was die Bedienung vereinfacht. Der Regler gleicht nicht nur die Proportionalitätsfehler infolge von Kennlinienkrümmung aus, sondern bewirkt gleichzeitig eine Eliminierung von Störgrössen durch Lasteinwirkung. Eine automatische Nachführung des primären Drehzahlreglers bei w_1 gemäss voreingestelltem Sollwert w_2 sorgt für die Einhaltung einer konstanten Kondensatorspannung U_C und damit auch für Konstanz des Generatorflusses Φ. Der Stellbefehl $+m_1$ wird wie bei Handsteuerung über die Drucktaste **+F2** eingegeben, er bewirkt aber zunächst eine Abregelung des Transformators. Hauptstellgrösse ist diejenige Kraftstoffmenge je Zylinderhub (Regelsignal y_1), die aus dem Zusammenspiel beider Regler mit der geregelten Maschine (Regelstrecke) herauskommt, wobei



Figur 5
Prüfschaltung zur Gewährleistung der Reaktorbetriebstauglichkeit auf dem Testgelände der FKH in Däniken

1 Reaktorspule L_1 unter Abnahmebedingungen 285 kV, 13 A, 3500 kVA, 1 min
2 Lastkondensator 70 nF, 300 kV (Stossgenerator 2,4 MV, 50 kJ)
3 Spannungsteiler
4 DAT-Generator
5 Speisekabel

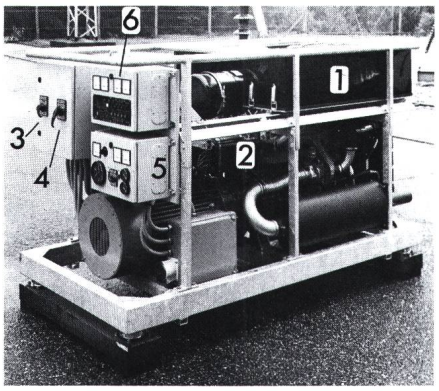
$$w_1 - x_1 = P_1 \cdot y_1;$$
$$w_1 \sim \int (w_2 - x_2)\, dt$$

Der mechanische Fliehkraftregler MDR1 ist in die Einspritzpumpe des Dieselmotors integriert. In der Ausführung als sog. Alldrehzahlregler mit angebautem elektrischem Drehzahlverstellmotor M1 wird jene Robustheit und Präzision erreicht, die von Anfang an als notwendig erkannt worden war. Die Steuerbarkeit von Resonanzlasten muss nämlich mit einer Bandbreite unter 1 Hz gewährleistet werden, was Frequenzkonstanz besser als 0,1 Hz bedeuten kann [1]. Eine wichtige Voraussetzung zur sicheren Spannungseinstellung am Resonanzkreis ist auch ein ausreichend hoher Regler-P-Grad.

Die grosse Statik des proportional wirkenden Primärreglers ($P_1 = 30\%$ bei 1500 und mindestens 10% bei 3000 min^{-1}) macht die Maschine empfindlich gegen Spannungs- und Frequenzänderungen bei Lastwechsel. Der vorgeschaltete elektronische Regler ESR2 behebt diesen Mangel und macht die Maschine vielseitig verwendbar. Es handelt sich um einen bei der FKH entwickelten integrierenden Abtastregler. Mit einer langsamen Tastrate werden pulsförmige Stellsignale $y_2 = \pm 0...25$ Vs/s der vollen Steuerspannung 28 V Gleichstrom in den Stellmotor M1 eingespeist. Der Reglerspannungseingang x_2 ist umschaltbar zur Verwendung als Spannungs- oder als Flussregler (U_A oder U_C). Eine weitere Einsatzmöglichkeit, als Frequenzregler, wurde bisher nicht benötigt.

6.3 Unsymmetrische Erregungen

Die kontrollierte Abstimmbarkeit der Erregerkapazität C_E mit Hilfe von Regeltransformatoren kann auch dazu verwendet werden, Symmetrierungsschaltungen in einem grösseren Frequenzfahrbereich anzuwenden. Dies gelingt auf einfache Art, indem Phasenkompensationsmittel (C und L in Fig. 3c) nur grobstufig als ganzzahlige Vielfache von C_E eingesetzt werden, so dass sich die in Abschnitt 5 genannten Abstimmbedingungen ohne besonderen Aufwand erfüllen lassen. Es ist nicht sinnvoll, eine Phasensymmetrierschaltung für jeden Lastfall vorzubereiten. Schon eine angenäherte Symmetrierung im Vollastbetrieb vermag



Figur 6 Ansicht des DAT-Generators

1 Erregertransformatoren
2 Anpasstransformatoren
3 Maschinenumschalter
4 Transformatorumschalter
5 Zentralsteuerkasten
6 Fernsteuerkasten

die Verluste wesentlich zu reduzieren und die Maximalleistung der Maschine zu steigern. Gleichzeitig sucht man den Gesamtschaltungsaufwand zu minimalisieren.

Ein dreiphasiger Asynchrongenerator mit leistungsfähiger (d.h. stark gekrümmter) Regelcharakteristik weist einen Magnetisierungsstrom je Strang in mindestens gleicher Höhe wie der Wirkstrom auf (Wicklungs-cosφ = 0,5...0,7). Man nehme an, dass der symmetrische Erregerstrom je Strang I_{C1} in einer Dreieckschaltung aus Kondensatoren oder symmetrisch angeschlossenen supponierten Regeltransformatoren (3mal C_E entsprechend Fig. 3b) dem Betrag des äusseren Klemmenstroms I_1 entspricht (ein verketteter symmetrischer Dreiphasenstrom, der in die komplex zusammengesetzte Lastimpedanz R-C-L abfliesst, Fig. 3c). Dann ergibt sich Betragsgleichheit der Ströme in Figur 3d mit I_{C1}:

$$I_L = I_C = I_1 = I_{C1} (= 35\ \text{A})$$

Die maximale einphasige Dauerleistung entsprechend $\sqrt{3} \cdot 35\ \text{A} \cdot 1000\ \text{V}$ = 60 kW ist nur wenig geringer als die dreiphasige Dauerleistung 75 kW. Es bietet sich an, die Ströme I_L und I_{C1} gegeneinander abzutauschen, so dass die Kompensationsdrossel L eingespart und der Erregertransformator zum Kondensator C gemacht werden kann. Die folgende bei reiner Wirklast anzuwendende Verteilung der Erregertransformatoren auf die Phasen 0-2-1 bewirkt eine vollständige Symmetrierung nach Steinmetz:

$I_L + I_{C1} = 0$
Klemmen 1-3 bzw. A-C

$I_C + I_{C1} = 2 I_{C1}$
Klemmen 2-3 bzw. B-C

$(I_R) + I_{C1} = I_{C1}$
Klemmen 1-2 bzw. A-B

Für die Speisung des Hochleistungs-Resonanzkreises gehe man von einem kapazitiven Lastphasenwinkel $\varphi = 30°$ aus (vgl. Resonanzkurve in [1]). Es wird ein Ausgangsstrom I_A = 100 A verlangt, der bei maximaler Klemmenspannung U_A = 1000 V einer Überlast-Klemmenleistung von 100 kVA einphasig gleichkommt.

Die Komponenten des Laststromes betragen:

$$I_{AC} = I_A/2 = 50\ \text{A}$$
$$I_{AR} = I_A \cdot \sqrt{3}/2 = 85\ \text{A} = \sqrt{3} I_{AC}$$

Die kapazitive Lastkomponente I_{AC} kann einen Erregertransformator ersetzen, so dass eine Verteilung 0-2-0 resultiert. Hierbei kann die Steinmetzbedingung erfüllt werden, wenn die verbleibenden an der Klemme C parallel angeschlossenen Transformatoren T1, T2 passend zu I_{AC} eingestellt werden. Der Strom I_{C1} = 50 A ergibt eine Erregerleistung von insgesamt 2 × 50 kvar. Der hohe Erregerstrom dient jetzt auch zur Deckung von Magnetisierungsleistung in den Streureaktanzen des Generators (schlupfabhängig entsprechend der Annäherung an das Kippmoment). Zur Beherrschung der Überlastfähigkeit wird Handsteuerung empfohlen (Option **+F1** wenn nötig kombiniert mit weiterer Flussverstärkung **+C**). Die abgegebene Wirkleistung kann $U_A \cdot I_{AR}$ = 85 kW (Twinbetrieb 170 kW) erreichen. Damit ist die Leistungsfähigkeit des Dieselmotors erreicht oder bereits überschritten, was vom Zustand der angesaugten Verbrennungsluft abhängt (Luftdruck und Temperatur).

In einer Ausstattung mit drei Erregertransformatoren (Hintermaschine 1 in Fig. 1c) kann der Generator eine hohe einphasige Dauerleistung in einen induktiven Stromkreis abgeben. Mit einer Verteilung 0-0-3 stehen maximal 100 kVA induktiv einphasig im Dauerbetrieb bei 500 V, 70 Hz zur Verfügung.

7. Andere Einsatzgebiete des Generators

Vom Konzept her sind Modifikationen möglich, die den dieselangetriebenen asynchronen Generator mit elektronischer Spannungsregelung auch für ein breiteres Anwendungsfeld geeignet erscheinen lassen. Mit entsprechenden Vereinfachungen im Schaltungs- und Steuerungsaufwand lässt sich bestimmt ein sehr leistungsfähiges und preisgünstiges Notstromsystem ableiten. Schon heute wird der DAT-Generator von der FKH ausser bei Resonanzprüfungen eingesetzt für:

- Netzunabhängige Stromversorgung. Eine wertvolle Hilfe bei der Durchführung von Feldversuchen ist die grosse Flexibilität betreffend Ströme, Spannungen und Frequenzen. Insbesondere wird die Potentialfreiheit bei ausgedehnten Hochspannungsversuchen sehr geschätzt.
- Erdungsmessungen. Es wird eine starke einphasige Stromquelle verlangt, welche nicht-netzfrequente regelbare induktive Ströme über Leitungsschleifen oder Kabelsysteme treiben kann.
- Teilentladungsmessungen. Die Störungsfreiheit der Spannung prädestiniert den Generator als Stromquelle zur Ausführung von Vorort-TE-Messungen an grösseren Objekten [2], wobei keine Netzfilter erforderlich sind (keine Schleifringe oder Kollektoren).

Literatur

[1] *H. Binz* und *H.G. Gerlach:* Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung an SF_6-Schaltanlagen und an PE-Hochspannungskabeln nach dem Serienresonanz-Prinzip. Bull. SEV/VSE 79(1988)13, S. 763...768.

[2] *A. Klaus* und *H.G. Gerlach:* Teilentladungsmessung an Hochspannungsapparaten in ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen. Bull. SEV/VSE 79(1988)13, S. 769...774.

[3] *G. Biasiutti:* Vorortprüfung von Kunststoffenergiekabeln mittels Gleichspannung. Bull. SEV/VSE 78(1987)23, S. 1431...1437.

[4] *E. Jäckle:* Prüfung von Kabelanlagen mit Resonanz-Prüfgeräten. Elektrizitätswirtschaft 86(1987)7, S. 260...262.

[5] *J.W. Schroeder:* Einphasige Belastung selbstregelnder Asynchrongeneratoren. ETZ-A 82(1961)3, S. 83...85.