

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 24

Artikel: Schutz der Statoren von Grossgeneratoren durch elektrische Relais
Autor: Kolar, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916428>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

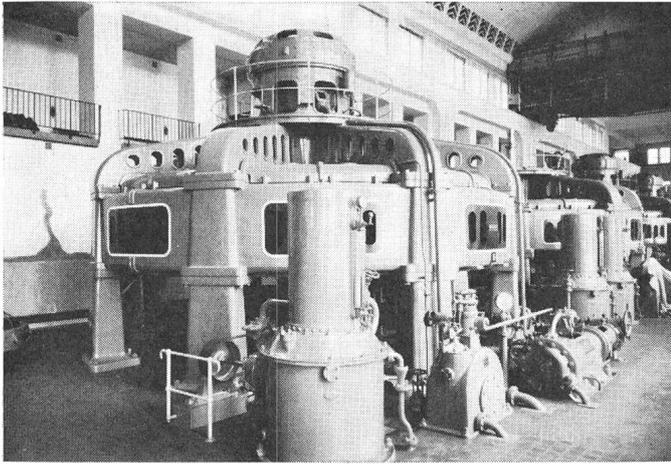


Fig. 5
Blick auf die Maschinenanlage vor dem Umbau

Die automatische Steuerung ist heute bei drei der sieben Drehstromgruppen im Kraftwerk Gösgen in Betrieb (Fig. 5, 6), bei den übrigen Maschinen in Ausführung. Für die achte Gruppe ist eine entsprechende Anlage geplant. Nach Abschluss dieser Arbeiten ist der Betrieb ohne Bedienung im Maschinsaal verwirklicht. Ein weiterer Schritt in der Auto-

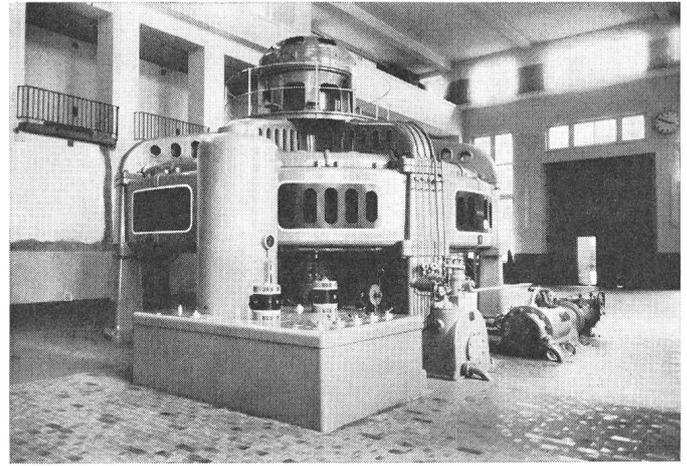


Fig. 6
Maschine 1 nach erfolgter Modernisierung

matisierung wird dann darin bestehen, die Zu- und Abschaltung sowie die Belastung der Maschinen abhängig von der jeweiligen Wasserführung und im Bereiche des günstigsten Wirkungsgrades der Gruppen automatisch zu steuern.

Adresse des Autors:
R. Markwalder, Ingenieur, Aare-Tessin AG für Elektrizität, 4600 Olten.

Schutz der Statoren von Grossgeneratoren durch elektrische Relais

Von A. Kolar, Zürich

621.316.925 : 621.313.1

Es werden die grundsätzlichen Anforderungen an Schutz-einrichtungen mit elektrischen Relais allgemein, sowie für Generatoren speziell zusammengestellt. Wegen des grossen Kapitalwertes werden für den Schutz von Grossgeneratoren alle einschlägigen, herkömmlichen Schutz-einrichtungen angewendet. Deren Beschreibungen folgen anschliessend. Da Kurzschlüsse die schwersten Fehlerfolgen haben, wird der Differentialschutz eingehender behandelt. Projektierungshinweise ergänzen die einzelnen Abschnitte fallweise.

Exposé des exigences fondamentales posées aux équipements de protection par relais électriques en général et pour les alternateurs en particulier. En raison de l'importance des capitaux investis, tous les équipements de protection usuels nécessaires sont utilisés pour protéger les grands alternateurs. L'auteur passe ensuite en revue ces différents équipements. Etant donné que des courts-circuits peuvent avoir de graves conséquences, la protection différentielle est traitée en détail. Des indications relatives aux projets d'équipements complètent les différents paragraphes.

1. Einleitung

Durch die Erschöpfung wirtschaftlich ausbauwürdiger Wasserkräfte in der Schweiz ist in den letzten Monaten eine lebhaft diskutierte Verwendung anderer Energieträger als Wasserkraft — Öl, Atomenergie — zur Gewinnung von elektrischer Energie entstanden. Allen Standpunkten gemeinsam ist die Anerkennung der Tatsache, dass die Versorgung der Schweiz mit elektrischer Energie in Zukunft einstweilen in vermehrter Masse, aus wirtschaftlichen Gründen durch Energieerzeugung aus Grossgeneratoren erfolgen wird; und zwar handelt es sich sowohl im Falle klassischer Dampfkraftwerke als auch bei Atomkraftwerken um Turbogeneratoren.

Der vorliegende Artikel behandelt den Schutz des Stators von Grossgeneratoren.

2. Aufgabe des Generatorschutzes

Der Generatorschutz hat die Aufgabe, durch innere oder äussere Ursachen hervorgerufene Gefährdungen der Maschine entweder überhaupt zu verhindern oder deren Auswirkungen auf ein erträgliches Mass zu reduzieren. In die-

sem Sinne umfasst er den Schutz durch Überspannungsableiter, alle Lager- und Kühllufttemperaturüberwachungen, Temperaturfühlermessungen, Vibrationsmessungen, Einbau von Kurzschlussdrosselspulen, Entregungseinrichtungen, Relaischutz usw. Vorliegender Aufsatz beschränkt sich nur auf den Schutz durch elektrische Relais.

Um seiner Aufgabe zu genügen, muss der Relais-Schutz zuverlässig, rasch, selektiv und empfindlich sein.

Da jeder Schutz die natürliche Versicherung des von ihm geschützten Objektes darstellt, ist die *Zuverlässigkeit* an allererster Stelle zu setzen. Die Zuverlässigkeit umfasst hierbei nicht nur die Zuverlässigkeit der Schutzrelais selbst, sondern die Zuverlässigkeit einer jeden Komponente des Schutzkreises. Dieser ist in Fig. 1 als negativ rückgekoppelter Regelkreis dargestellt. Im Falle eines Ansprechens des Schutzrelais wirkt dieses auf die Bahn des auslösenden Signals ein: durch Betätigen des Leistungsschalters wird dieses Signal auf den Wert Null geregelt. Alle Komponenten des Schutzkreises müssen daher den objektgebundenen elektrischen Anforderungen wie Prüfspannung, Kurzschlussfestigkeit, Alterungsbeständigkeit, Abschaltvermögen auch bei gleich-

zeitigem Auftreten mehrerer ungünstiger Bedingungen ebenso genügen, wie den durch den Aufstellungsort gegebenen Umgebungsbedingungen wie z. B. aggressive Atmosphäre, hohe Umgebungstemperatur, exponierte Aufstellungsorte. Nach längeren, wartungsfreien Pausen muss im Fehlerfalle rasch und eindeutig ein Entscheid über eine fallweise Ausserbetriebnahme des Schutzobjektes getroffen werden.

Gerade diese ständige Einsatzbereitschaft über oft mehrere fehlerfreie Jahre stellt erhebliche Anforderungen an den konstruktiven Aufbau von Schutzrelais.

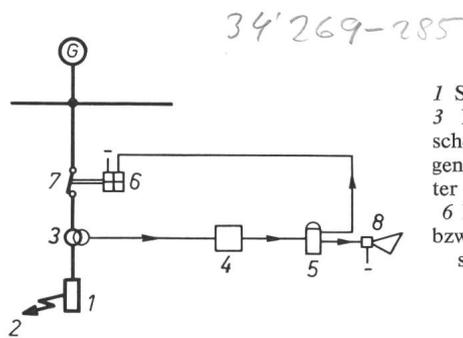


Fig. 1
Der Schutzkreis
1 Schutzobjekt; 2 Fehler;
3 Messwandler; 4 Zwischen-
elemente: Zuleitungen,
Zwischenwandler, Filter
usw.; 5 Schutzrelais;
6 Leistungsschalterspule
bzw. -antrieb; 7 Leistungs-
schalter; 8 Meldung;
G Generator

Die *Schnelligkeit* eines Schutzkreises ist durch die Ausschaltgeschwindigkeit der Leistungsschalter, der Kommandozeit der Schutzrelais und in geringerem Masse durch elektrische bzw. magnetische Zeitkonstanten der übrigen Kreis-komponenten gegeben. Hier erlauben die in voller Entwicklung begriffenen elektronischen Schutzrelais [1]¹⁾ wesentliche Zeiteinsparungen zu erzielen.

Unter *Selektivität* einer (Haupt-) Schutz-einrichtung versteht man ihre Fähigkeit, nur den fehlerbetreffenen Anlageteil abzuschalten. Die übrigen, fehlerfreien Anlageteile bleiben in Betrieb. Die Selektivität hängt wesentlich von der Projektierung des Schutzes selbst ab: es muss vor allem eine grundsätzlich für die zu erfassende Fehlerart geeignete Schutz-einrichtung ausgewählt werden. Im weiteren sind die Messteile des Schutzkreises wie Messwandler, Zwischenwandler, Filter, Relaismeßsysteme usw. so auszulegen, dass sie den fehlerartbedingten Anforderungen angepasst werden. In diesem Sinne muss z. B. ein herkömmlicher Differentialschutz so ausgelegt werden, dass alle Haupt- und Zwischenwandler beim maximalen durchgehenden Kurzschlußstrom nicht gesättigt werden. Aus diesem Grunde müssen die Zuleitungen möglichst kurz und von grossem Querschnitt sein, die Zwischenwandler und die Relais mit kleinem Eigenverbrauch gewählt, und der Differentialschutz an einen eigens für ihn reservierten Kern angeschlossen werden.

Die *Empfindlichkeit* einer Schutz-einrichtung ist den realen Erfordernissen anzupassen. Diese sind z. B. minimaler Kurzschlußstrom, minimale Spannungserhöhung bei Lastabwurf, zulässige Spannungsverlagerung bei Erdschluss. Bei Schutz-einrichtungen mit begrenztem Schutzbereich ist die Empfindlichkeit der Einrichtungen praktisch nicht — wie meist angenommen wird — durch die Empfindlichkeit der Schutzrelais selbst, sondern durch die während der Messung oder, noch schlimmer, ohne die Messgrösse auftretenden Störgrössen begrenzt. Solche Störgrössen sind z. B. 3. Ober-

wellen in der Nullspannung und Sternpunktverlagerungen durch Phasenunsymmetrien. In diesem Falle sind entweder Störgrössenfilterungen vorzunehmen, die Schutz-einrichtungen als Ganzes, insbesondere die Messwandler, den Erfordernissen der jeweiligen Einrichtung anzupassen oder es ist sogar die Messgrösse künstlich zu verstärken, um einen entsprechenden Störabstand zu erhalten.

3. Erfasste Fehler

Die von Schutz-einrichtungen an Generatoren erfassten Fehler können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden. So z. B. nach ihrer Verursachung: die Fehler können in der Maschine selbst — wie etwa durch Isolationsdurchschlag der Wicklungen — in ihrem Antrieb — z. B. Restdampf bei nicht vollständig geschlossenen Ventilen — oder als von aussen stammend — z. B. Selbsterregung bei Zuschalten langer Leitungen — ihre Ursache haben.

Weiters kann die Einteilung nach dem Zeitpunkt des Eingreifens der Schutz-einrichtung getroffen werden: ob die Einrichtung erst nach eingetretenem Fehler abschaltet, den Fehler also nicht verhindern kann, sondern nur durch rascheste Ausserbetriebnahme der Maschine die Fehlerfolgen reduziert, oder aber ob die Schutz-einrichtung vorbeugend arbeitet. Solche Einrichtungen wirken meist auf Signalisierung, da im Moment keine direkte Gefährdung des Schutzobjektes vorhanden ist. Eine erste, hieher zählende Gruppe bilden alle Einrichtungen, die Fehler mit analogem, also stetig variablem Charakter erfassen: typische Vertreter sind hier thermische Schutz-einrichtungen. Die zweite Gruppe sind Schutz-einrichtungen zur Erfassung diskreter Fehler, die aber erst bei paarweisem Auftreten die Maschine gefährden: dies sind z. B. Rotor- und Statorerdschlußschutz-einrichtungen. Als isolierter Einzelfall sei hier noch der Selbsterregungsschutz angeführt: er erfasst vorbeugend einen Vorgang mit exponentiellem Verlauf. Durch das im Vergleich zu den ihn bremsenden Feldänderungszeitkonstanten schnellere Abschalten der Maschine verhindert er das Auftreten eines echten Fehlers.

Die wegen ihrer Schadenauswirkung bedeutendste Gruppe sind diskrete Fehler, die bereits bei Einzelauf-treten zur direkten Gefährdung der Maschine führen: es sind dies die kurzschlussartigen Fehler wie mehrpolige Kurzschlüsse oder Windungsschlüsse.

4. Aufbau des Schutzes

Der Generatorschutz wird mit wenigen Ausnahmen für jede erfasste Fehlerart aus *Haupt-* und *Reserveschutz-einrichtungen* aufgebaut.

Hauptschutz-einrichtungen sind Schutz-einrichtungen, die zufolge ihres grossen Schutzbereiches oder/und ihrer Schnelligkeit Fehler in der von ihnen geschützten Zone vor dem Eingreifen anderer Schutz-einrichtungen abschalten. Die Schutzzone ist meist ausdehnungsmässig streng begrenzt. Ein typischer Vertreter dieser Art ist der Differentialschutz, der nur Fehler zwischen den Stromwandlersätzen erfasst, auf aussenliegende Fehler jedoch überhaupt nicht reagiert.

Reserveschutz-einrichtungen sind solche, die erst nach fallweisem Versagen von Hauptschutz-einrichtungen eingreifen. Sie sind meist nicht selektiv: die von ihnen geschützte

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Zone erstreckt sich über zwei oder mehrere von Hauptschutzeinrichtungen geschützte Zonen. Um die Selektivität der Hauptschutzeinrichtungen nicht zu stören, erfolgt ihr Ansprechen meist zeitverzögert.

Den Reserveschutz selbst kann man wieder in einen *lokalen Reserveschutz* und *entfernten Reserveschutz* unterteilen. Wie der Name sagt, ist jener am gleichen Ort wie der Hauptschutz eingebaut, dieser jedoch erst beim nächstgelegenen Leistungsschalter. Der entfernte Reserveschutz bietet demnach den Vorteil, auch bei einem allfälligen Versagen des Auslösekanals und insbesondere des der Hauptschutzeinrichtung zugeordneten Leistungsschalters noch ein Abschalten des Fehlers zu erhalten. Staffelschutzeinrichtungen sind typische Vertreter dieser Art von Schutzeinrichtungen.

5. Einzelne Schutzeinrichtungen des Stators

Der Stator von Generatoren ist als ruhender Teil keinen mechanischen Beanspruchungen durch Fliehkräfte ausgesetzt. Er ist aber durch seine galvanische Kopplung mit dem gespeisten Netz und seinen mehrphasigen Aufbau trotzdem mehr gefährdet als der Rotor. Die Mehrzahl der Schutzeinrichtungen erfasst daher Defekte des Stators.

5.1 Überlastschutz

Unzulässige Überlastung von Maschinen führt zur Überbeanspruchung der Wicklungsisolation. Bei geringen Überbeanspruchungen wird die Lebensdauer der Isolation reduziert; bei starken Überlastungen kann es sogar zum Wärmedurchschlag [2] kommen, der dann zu einem Erd- bzw. Kurzschluss führen kann. Zweck des Überlastschutzes ist es, solche schädlichen Übererwärmungen zu verhindern.

Grossgeneratoren besitzen in der Regel mehrere in die Wicklungen eingebaute Widerstandsthermometer oder Thermolemente. Da diese jedoch vom eigentlichen Wicklungskupfer durch die Stabisolation getrennt sind, verhalten sie sich thermisch bei schnellen Belastungsänderungen recht träge. Sie messen daher eigentlich nicht die Kupfertemperatur, sondern diejenige des Eisens. Des weiteren sind solche Thermolemente an, nach der Montage meist schwer zugänglichen Stellen des Generators eingebaut, so dass sie im Falle eines Defektes kaum ersetzt werden.

Aus diesem Grunde wird der Überlastschutz von Generatoren vorteilhaft durch *Thermorelais* realisiert.

Solche Relais stellen ein weitgehendes thermisches Abbild des von ihnen geschützten Generators dar. Sie haben zwei thermische Zeitkonstanten, eine kleine und eine grosse. Die kleinere bildet das Wicklungskupfer mit seiner geringen Masse, die grosse das Statoreisen mit seiner grossen Masse nach. Konstruktiv sind die Thermoelais zu diesem Zwecke so aufgebaut, dass sie für die kleine Zeitkonstante ein direkt beheiztes Bimetallpaket haben. Für die grosse Zeitkonstante wird das Bimetallpaket mit einem entsprechend massigen Strahlungskörper umgeben. Bei Überschreiten des einstellbaren zulässigen Dauerstromes des Generators löst das Relais entsprechend seinen Zeitkonstanten verzögert aus. So erlaubt es, die thermischen Möglichkeiten des Schutzobjektes voll auszunützen, indem es bei kalter Maschine grössere Überlasten kurzzeitig zulässt, bei warmer Maschine solche aber verbietet.

Schaltungstechnisch arbeitet der Überlastschutz nur in unbemannten z. B. ferngesteuerten Kraftwerken direkt auf Abschaltung. Im gewarteten Maschinenhaus jedoch signalisiert das Relais der mittleren Phase und nur die Relais der beiden äusseren Phasen bewirken die Abschaltung (Fig. 2). Diese beiden Relais sind dabei auf einen etwas höheren thermischen Auslösestrom eingestellt. Durch die vorgängige Signalisierung ist es dem Personal möglich, geeignete Massnahmen zur Beseitigung der schädlichen Überlast, wie z. B. Einsatz von Reserveeinheiten oder Entlastung durch andere Kraftwerke, zu ergreifen. Lässt sich die Überlast auf diese Weise nicht beseitigen, so muss definitiv abgeschaltet werden. Durch eine einbaubare Momentauslösung kann gemeinsam mit einem Zeitglied ein einfacher Reserve-Kurzschlusschutz erreicht werden.

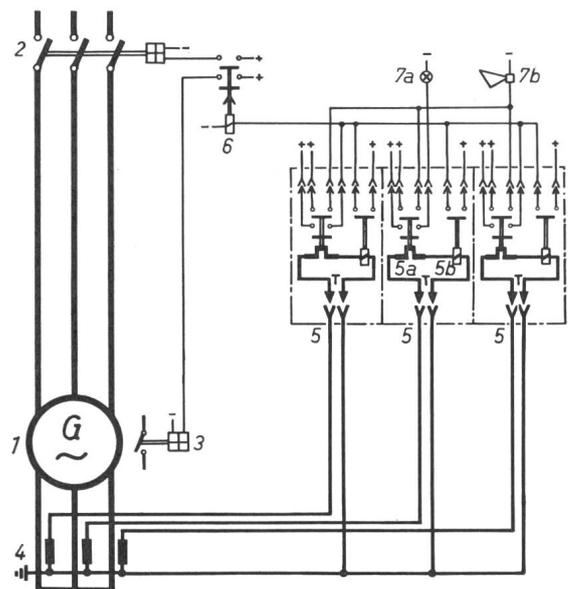


Fig. 2
Überlastschutz, kombiniert mit Kurzschlusschutz
1 Generator; 2 Leistungsschalter; 3 Entregungsschalter; 4 Stromwandler; 5 Überlastschutz-Relais; 5a thermische Auslösung; 5b Momentauslösung; 6 Zeitglied; 7a optisches Signal; 7b akustisches Signal

Wie in Fig. 2 angedeutet, werden die Thermoelais genau wie alle im folgenden beschriebenen Schutzrelais vorteilhaft steckbar ausgeführt. Dies gestattet eine leichte Prüfung und Revisionsmöglichkeit.

5.2 Kurzschlusschutz

Kurzschlüsse zählen zu jenen Fehlern, die die schwersten Zerstörungen in elektrischen Anlagen bewirken. Nebst den elektrischen Schädigungen wie Leiterisolationserstörung und Blechpaketverschweissungen treten auch mechanische Schädigungen, wie etwa Wickelkopfdeformationen auf. Ein schnellwirkender Maschinenschutz gegen interne Kurzschlüsse ist daher unbedingt erforderlich.

Bei externen Kurzschlüssen bricht am Generator die Spannung zusammen. Ausser Stabilitätsgefährdungen in Fällen des Parallelarbeitens mit anderen Generatoren über lange Leitungen führt dies zu keiner direkten Gefährdung des Generators. Für allfälliges Versagen des Netzschutzes oder des diesem zugeordneten Schalters ist aber an der Maschine ein Reservekurzschlusschutz vorzusehen. Ohne separaten Schutz für die Sammelschiene der Blockschaltung

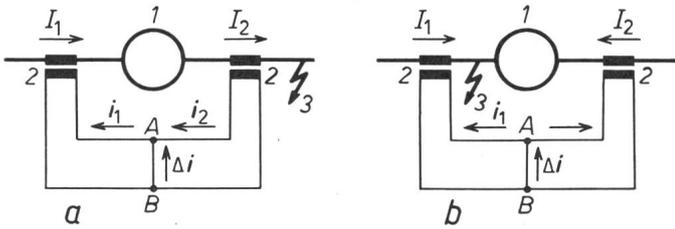


Fig. 3

Differentialschaltung

a aussenliegender Fehler, $\Delta i = i_1 - i_2 = 0$; b innenliegender Fehler, $\Delta i = i_1 + i_2 > 0$
 1 Schutzobjekt (z. B. Generator); 2 Stromwandler; 3 Fehler;
 AB Differentialpfad

übernimmt er für diese die Funktion des generatorseitigen Hauptschutzes.

5.2.1 Kurzschlußschutz für interne Fehler

Den Schutz gegen interne Kurzschlüsse übernehmen der Differentialschutz und der Windungsschlußschutz.

5.2.1.1 Differentialschutz

Im Normalbetrieb oder bei aussenliegendem Fehler sind die Ströme zu beiden Seiten des Schutzobjektes gleich gross. Bei internen Fehlern wird jedoch der Strom auf der einen Seite Null oder kehrt seine Richtung um. Diese Eigenschaft wird in der Differentialschaltung (Fig. 3) ausgenutzt. Die dem Schutzobjekt zu- bzw. abgewandten Enden der Sekundärwicklungen von Stromwandlern werden jeweils miteinander verbunden und zwischen diese Verbindungen eine leitende Brücke, der «Differentialpfad» (AB in Fig. 3) geschaltet. Im fehlerfreien Betrieb oder bei aussenliegendem Fehler fliesst bei ideal übersetzenden Stromwandlern durch den Differentialpfad kein Strom. Ein in diesen hineingeschaltetes Maximalstromrelais bleibt unerregt. Bei innenlie-

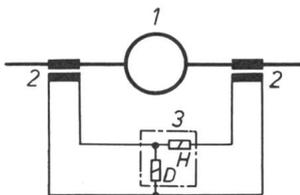


Fig. 4

Differentialschutz mit Prozentdifferentialrelais

1 Schutzobjekt; 2 Stromwandler;
 3 Prozentdifferentialrelais; 4 Haltesystem; D Auslösesystem

gendem Fehler (Fig. 3b) fliesst durch ein solches Relais mindestens der von einer Seite zufließende Strom oder bei zweiseitiger Fehlerspeisung die Summe der Ströme. Das Relais im Differentialpfad wird erregt und löst aus.

Aus Empfindlichkeitsgründen wird nun in der Praxis kein einfaches Maximalstromrelais, sondern ein Prozentdifferentialstromrelais verwendet. Solche Relais haben zwei Meßsysteme: das einem gewöhnlichen Maximalstromrelais entsprechende, in Auslöserichtung wirkende Differentialsystem, sowie ein dagegen wirkendes Meßsystem, das Haltesystem (Fig. 4). Wird der durch das Haltesystem fließende Strom als Haltestrom i_H bezeichnet, so ergibt sich in Abhängigkeit vom Differentialstrom Δi eine Auslösecharakteristik nach Kurve 2 in Fig. 5. Diese Charakteristik liegt stets über der durch den Übersetzungsfehler der Stromwandler gegebenen Kennlinie (Kurve 3 in Fig. 5). Bei innenliegendem Fehler ergibt sich (Schnittpunkte P_{24} und P_{25} in Fig. 5) trotzdem fast die gleiche Empfindlichkeit wie bei Verwendung eines gewöhnlichen Maximalstromrelais. Dieses löst (Schnitt-

punkt P_{31} in Fig. 5) bereits bei Kurzschlußströmen von etwa Nennstromgrösse bei externen Fehlern aus; zur Vermeidung solcher Fehlauflösungen müsste es bedeutend unempfindlicher, nämlich auf etwa 0,5...1 mal Nennstrom statt 0,05...0,1 mal Nennstrom eingestellt werden. Dadurch wird die Verwendung von Prozentdifferentialrelais gerechtfertigt.

Der Differentialschutz erfasst mehrpolige Kurzschlüsse, Doppelerdschlüsse mit einem oder beiden Fusspunkten im Schutzbereich, Kurzschlüsse zwischen Phasen und Wicklungskurzschlüsse. Dagegen werden Windungsschlüsse nicht erfasst.

Anordnungsmässig ist beim Differentialschutz zwischen dem Feindifferentialschutz und dem Grobdifferentialschutz zu unterscheiden (Fig. 6).

Der *Feindifferentialschutz* schützt nur den Generator. Für diesen bildet er den Hauptschutz gegen interne Kurzschlüsse. Er wird von Stromwandlern an den Generator-

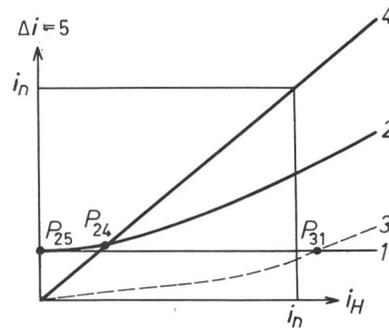


Fig. 5

Stromcharakteristiken einer Differentialschaltung

1 Ansprechkenlinie eines Maximalstromrelais; 2 Ansprechkenlinie eines Prozentdifferentialrelais; 3 Strom im Differentialpfad bei aussenliegenden Fehlern, bedingt durch Übersetzungsfehler der Stromwandler; 4 Stromcharakteristik bei internen Fehlern, Speisung von rechts; 5 wie 4, jedoch Speisung von links; i_H Haltestrom; Δi Differentialstrom; P_{25} Schnittpunkt von 2 und 4; P_{24} Schnittpunkt von 2 und 5; P_{31} Schnittpunkt von 3 und 1

klemmen und im Sternpunkt gespeist. Diese Stromwandler kann man genau gleich, also als identische Konstruktionen mit identischen Daten, ausbilden. Zwischenwandler werden keine benötigt. Im weiteren ist bei aussenliegendem Fehler der Kurzschlußstrom durch die Generatorimpedanz stark gedämpft. Aus allen diesen Gründen ergeben sich sehr günstige Arbeitsverhältnisse für die Differentialrelais; man kann besonders hoch empfindliche, niedrig kompensierte Differentialrelais verwenden. Ansprechwert und Kompensationsverhältnis k ($k = \Delta i / i_H$) werden in der Praxis zu ca. 5 % gewählt.

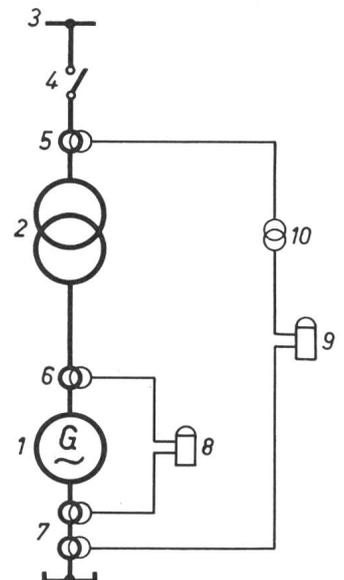


Fig. 6

Differentialschutz

1 Generator; 2 Transformator;
 3 Sammelschiene; 4 Leistungsschalter;
 5, 6, 7 Stromwandler;
 8, 9 Prozentdifferentialschutz (8 Fein-, 9 Grobdifferentialschutz);
 10 Zwischenstromwandler

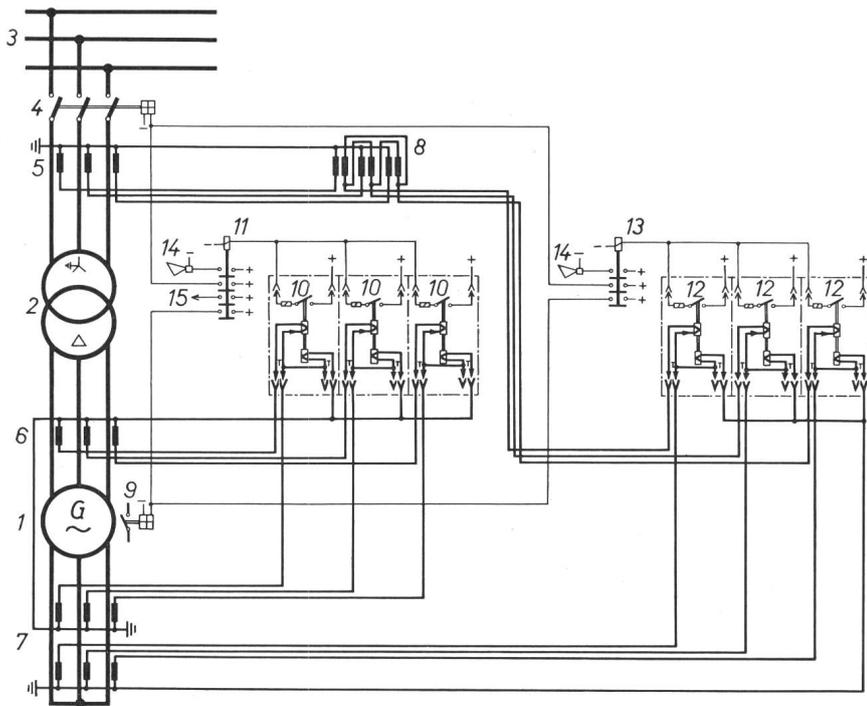


Fig. 7

Grob- und Feindifferentialschutz

1 Generator; 2 Transformator; 3 Sammelschiene; 4 Leistungsschalter; 5, 6, 7 Stromwandler; 8 Zwischenwandler; 9 Entregungsschalter; 10, 11 Feindifferentialschutz (10 Prozentdifferentialrelais, 11 Auslöseschütz); 12, 13 Grobdifferentialschutz (12 Prozentdifferentialrelais, 13 Auslöseschütz); 14 akustisches Signal; 15 Brandschutzauslösung (CO₂)

Der Grobdifferentialschutz ist dreimal weniger empfindlich auslegbar als der Feindifferentialschutz. Dazu tragen vor allem die Wandler (5 und 7 in Fig. 6 bzw. 7) bei. Ihre Daten und Konstruktion sind ungleich. Ebenso die Belastung: 5 in Fig. 6 ist bei Freiluftaufstellung nebst dem Relais mit der langen Zuleitung mit dem Eigenverbrauch des Zwischenwandlers (10 in Fig. 6) belastet. Ausserdem treten durch einen Stufenschalter des Transformators betriebsmässig Differenzströme im Relais auf.

Das Anschlussschema in Fig. 6 zeigt, dass der Feindifferentialschutz auch den Brandschutz auslöst. Bei einem Ansprechen muss ein Kurzschluss im Generator vorliegen, so dass der Feindifferential- und der Windungsschlusschutz als einzige Schutzseinrichtungen die relativ teuren Löscheinrichtungen betätigen.

Der *Grobdifferentialschutz* schützt den Generator und den Transformator. Für die Zone zwischen überspannungsseitigen Stromwandlern (5 in Fig. 6) und Wandlern an den Generatorklemmen (6 in Fig. 6), mit Ausnahme der unter dem Ölspiegel liegenden Teile der Transformatorwicklung, bildet er den Hauptschutz gegen Kurzschlüsse. Für den Feindifferentialschutz stellt er den — ersten und schnellen — Reserveschutz dar.

Schaltungstechnisch sind fast stets Zwischenstromwandler überspannungsseitig vorhanden. Die Gründe dafür sind:

1. Ausgleich der normalerweise verwendeten Stern-Dreieck-Schaltung der Blocktransformatoren. Da nach den Vorschriften des SEV Stromwandler in Hochspannungsanlagen direkt geerdet sein müssen, ist die notwendige Rückdrehung der Schaltgruppe durch eine Dreieckschaltung der Sekundärwicklung der Stromwandler nicht möglich. Dies erfolgt mit Hilfe der Zwischenwandler. Der Zwischenstromwandler ist bei starr geerdetem Transformatorsternpunkt auf der im Stern geschalteten Transformatorseite anzuordnen, um die Nullstromkomponenten abzusaugen und Fehlauflösungen bei externen Erdkurzschlüssen zu vermeiden;

2. Kompensation ungleicher Wandlersekundärströme, bedingt durch a) wegen der Nennstromreihe der Wandler vom Transformatorübersetzungsverhältnis abweichender Übersetzung der Stromwandler, b) fallweise vorhandener Wicklungsanzapfungen des Transformators;

3. Abweichende sekundäre Nennströme der Wandler: Die überspannungsseitigen Stromwandler können wegen Freiluftaufstellung zur Reduktion der Bürde der Zuleitungen reduzierte Nennströme von 1 oder 2 A haben.

Als Besonderheit muss erwähnt werden, dass bei einer Schaltung nach Fig. 6 bzw. 7 für den Grobschutz die Differentialrelais nicht einschalt sicher sein müssen. Da der Blocktransformator nicht leerlaufend an das Netz geschaltet, sondern spannungsmässig relativ langsam mit dem Generator hochgefahren wird, tritt kein Magnetisierungsstromstoss auf. Auch bei Netzkurzschlüssen arbeiten nicht einschalt sichere Relais einwandfrei, da ein Abschalten eines Kurzschlusses im Stromnulldurchgang erfolgt und bei den stets stark induktiven Kurzschlusskreisen der Magnetfluss im Transformator ebenfalls durch Null geht. Vieljährige praktische Erfahrungen haben diese theoretischen Verhältnisse durch positive Resultate erhärtet.

Hat die Schaltung zwischen Generator und Transformator einen Eigenverbrauch (Fig. 8), so ist dieser in den Schutzbereich des Differentialsschutzes einzubeziehen. Der Abgang erhält einen Stromwandler (12 in Fig. 8), der genau gleich wie die übrigen Generatorstromwandler (6 oder 7 in Fig. 8) auszulegen ist. Insbesondere hat er das gleiche Übersetzungsverhältnis wie diese aufzuweisen, auch wenn der Nennstrom des Abganges nur vielleicht 5 oder 10 % des Generatornennstromes beträgt. Dies, weil der Kurzschlussstrom hinter dem Stromwandler des Eigenverbrauchsabganges durch den Kurzschlussstrom des Generators und nicht durch den Nennstrom dieses Abganges gegeben ist.

Ist zwischen Eigenverbrauchsabgang und Generator ein Schalter, wie dies beim Hochfahren des Eigenverbrauchs über den Blocktransformator vom Netz her der Fall sein kann (Fig. 8b), so ist der Grobdifferentialschutz als «Drei-beinschutz» auszubilden. Beim Hochfahren des Eigenverbrauches ist ja der Generatorschalter offen, und im Falle eines Kurzschlusses im Eigenverbrauchsabgang ausserhalb der Schutzzone des Differentialsschutzes käme es bei Ausbildung des Schutzes nach Fig. 8a durch den direkten Ausgleich der Sekundärströme (im Kreis 12 – 10 – 5 in Fig. 8) zu einer stromlosen Haltespule des Prozentdifferentialrelais und damit zu einer Fehlauflösung.

Da der Blocktransformator leerlaufend an das Netz zugeschaltet wird, ist das Prozentdifferentialrelais des Grobschutzes in diesem Fall einschalt sicher auszubilden. Dazu sind optimal statische einschalt sichere Prozentdifferentialrelais [3] zu verwenden, die durch Zuführung des Quotienten aus der 2. Oberwelle des Differentialstromes und dem Differentialstrom selbst in den Haltekreis einschalt sicher gemacht werden. Dadurch ist es möglich, bei schweren internen Kurzschlüssen hochspannungsseitig (zwischen 5 und 2 der Fig. 8b) trotz starker Sättigung und Erzeugung von — in Halterichtung wirkenden — Oberwellen des Stromwandlers (5 der Fig. 8b) eine sichere Auslösung zu erhalten. Dies wurde bis zu Kurzschlußströmen von $100 I_n$ lückenlos gemessen.

Der Wandler 12 der Fig. 8 kann in bestimmten Fällen weggelassen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass im Eigenverbrauchsabgang 11 ein Transformator relativ kleiner Leistung sitzt; dessen Leistung muss so klein sein, dass der durch die Kurzschlussimpedanz dieses Transformators gegebene Kurzschlußstrom nicht den Ansprechwert des Grobdifferentialschutzes erreicht.

Abschliessend ist noch zu bemerken, dass der Differentialschutz stets an einen separaten Stromwandlerkern anzuschliessen ist, damit eine möglichst hohe Überstromziffer des Wandlers erhalten wird. Ausserdem ist auf gute Belastungssymmetrie der Wandler zu achten.

5.2.1.2 Windungsschlußschutz

Wird ein Teil der Windungen einer Phase des Stators kurzgeschlossen, so fliesst in den kurzgeschlossenen Windungen ein erheblicher Strom. Dieser wird nur durch die relativ kleinen Impedanzen der kurzgeschlossenen Windungen begrenzt. Die hohen Kurzschlußströme über die Fehlerstelle in solch einem Störfall bedingen somit die Notwendigkeit eines Windungsschlußschutzes.

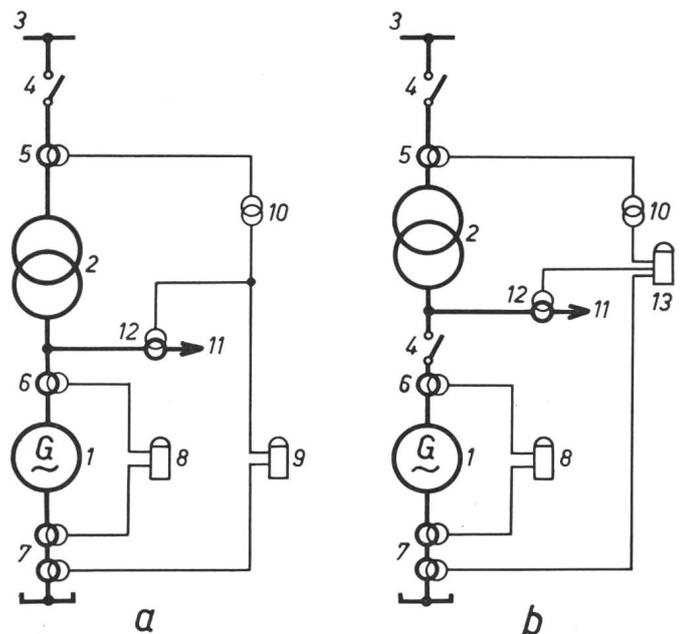


Fig. 8

Differentialschutz einer Schaltung mit Eigenverbrauchsabgang zwischen Generator und Transformator

a ohne Generatorschalter; b mit Generatorschalter

1 Generator; 2 Transformator; 3 Sammelschiene; 4 Leistungsschalter; 5, 6, 7, 12 Stromwandler; 8 Prozentdifferentialrelais, Feinschutz; 9 Prozentdifferentialrelais, Grobschutz; 10 Zwischenwandler; 11 Eigenverbrauchsabgang; 13 einschalt sicheres Prozentdifferentialrelais

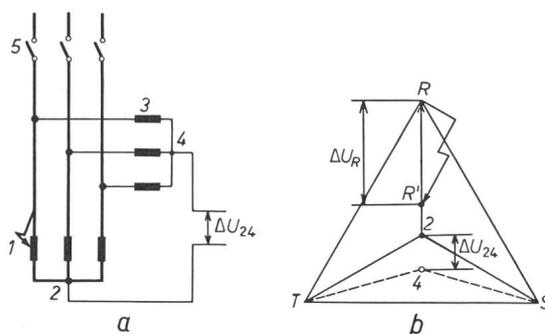


Fig. 9

Windungsschlußschutz

Messprinzip

a Schaltung; b Zeigerdiagramm

1 Generator; 2 Generatorsternpunkt; 3 Impedanzen zur Bildung des künstlichen Sternpunktes; 4 künstlicher Sternpunkt; 5 Leistungsschalter

Zu empfehlen ist ein Windungsschutz bei Maschinen mit vielen Leitern pro Nut. Im Extremfalle von zwei Leitern pro Nut ist die Wahrscheinlichkeit eines Windungsschlusses in der Nut selbst gering — dort kommt es viel eher zu einem Erdschluss — dagegen sind die Überkreuzungen an den Wickelköpfen gefährdet.

Messtechnisch erfolgt die Erfassung des Windungsschlusses durch eine Differenzspannungsmessung. Wird ein Teil der Wicklung einer Phase eines Generators kurzgeschlossen, so wird die Spannung der betreffenden Phase um den entsprechenden Betrag (ΔU_R in Fig. 9b) reduziert. Das Spannungsdreieck der Klemmenspannungen ist nicht mehr gleichseitig, sondern nur mehr gleichschenkelig ($R'ST$ in Fig. 9b). Wird durch gleichgrosse Impedanzen (3 in Fig. 9a) ein künstlicher Sternpunkt (4 in Fig. 9a) gebildet, so ist dieser mit dem Schwerpunkt des neuen Spannungsdreieckes identisch. Zwischen dem Generatorsternpunkt und dem künstlichen Sternpunkt ist eine Differenzspannung (ΔU_{24} in Fig. 9a) vorhanden, die die Existenz eines Windungsschlusses anzeigt.

Die skizzierten Verhältnisse gelten in der Praxis nur näherungsweise: tatsächlich tritt bereits beim Kurzschluss weniger Windungen eine beträchtliche Differenzspannung auf [4].

Da ohne Windungsschluss die erwähnte Differenzspannung nicht vorhanden ist, genügt ein gewöhnliches, zwischen beide Sternpunkte (2 und 4 in Fig. 9a) geschaltetes Maximalspannungsrelais zur Fehlererfassung.

Eine praktisch anwendbare Schaltung zeigt Fig. 10. Zur Bildung des künstlichen Sternpunktes wird zweckmässigerweise der ohnehin vorhandene Spannungswandler 4 verwendet. Sein primärer Sternpunkt wird mit dem Generatorsternpunkt verbunden. Sekundär erhält er zwei Wicklungen: die eine ist im offenen Dreieck geschaltet. An ihr wird die Differenzspannung gemessen und über einen Begrenzungswiderstand 6 den Windungsschlussrelais zugeführt. Die zweite Wicklung ist eine gewöhnliche, in Stern geschaltete Spannungswandler-Sekundärwicklung. An sie werden die im folgenden erwähnten Polarisationswicklungen der Windungsschlussrelais sowie fallweise andere Relais und Messinstrumente angeschlossen.

Die Windungsschlußschutzrelais werden dreiphasig ausgebildet. Es werden Ferrarisrelais verwendet, die nur bei Fehler der zugeordneten Phase ansprechen und so gleichzeitig die fehlerbetreffene Phase melden. Ein weiterer Vorteil der Ferrarisrelais besteht darin, dass sie nur dann ein Drehmoment ausbilden, wenn ihre beiden Spulensysteme Spannun-

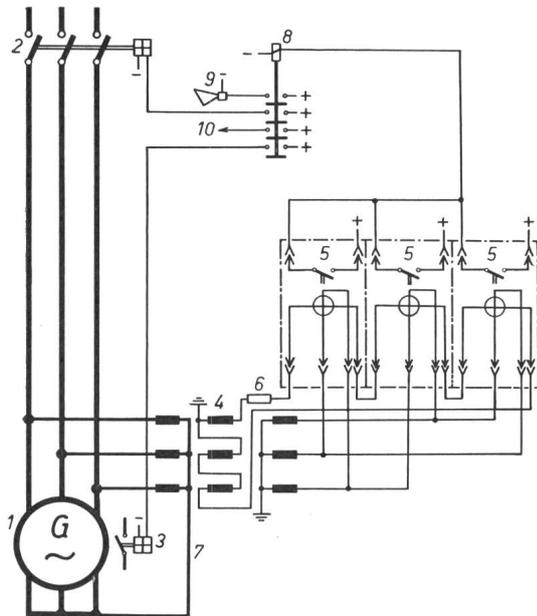


Fig. 10
Windungsschlusschutz
Anschlußschema

1 Generator; 2 Leistungsschalter; 3 Entregungsschalter; 4 Spannungswandler mit offener Dreieckwicklung; 5 Windungsschlussrelais (Maximalspannungsrelais); 6 Begrenzungswiderstand; 7 Sternpunktverbindungsleitung; 8 Auslöseschütz; 9 akustisches Signal; 10 Brandschutzauslösung (CO₂)

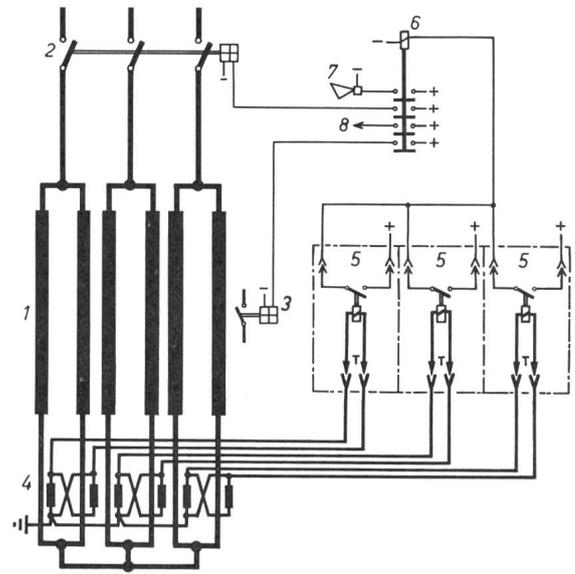


Fig. 11
Windungsschlusschutz eines Generators mit zwei parallelen Wicklungen
pro Phase
Anschlußschema

1 Generator; 2 Leistungsschalter; 3 Entregungsschalter; 4 Stromwandler in Achterschaltung; 5 Windungsschlussrelais (Maximalstromrelais); 6 Auslöseschütz; 7 akustisches Signal; 8 Brandschutzauslösung (CO₂)

gen der gleichen Frequenz zugeführt erhalten. Diese Eigenschaft wird zur Eliminierung des Einflusses der 3. Harmonischen benützt. Eine solche Oberwelle tritt lastabhängig in allen Phasenspannungen gleichzeitig auf. In der verketteten Spannung tritt wegen der Gleichphasigkeit der 3. Harmonischen in der Phasenspannung keine 3. Harmonische auf. In der offenen Dreieckwicklung jedoch kommt es zufolge dieser Gleichphasigkeit zu einer Addition der 3. Oberwelle. Im Ferrarisrelais selbst kann nun die der einen Wicklung des Relais zugeführte 3. Harmonische kein Drehmoment ausbilden, da der andern Relaiswicklung die oberwellenfreie verkettete Spannung zugeführt wird.

Für die Projektierung ist noch zu beachten, dass die Verbindungsleitung (7 in Fig. 10) vor allem wegen Beeinflussung des noch zu beschreibenden Erdschlußschutzes isoliert gegen Erde verlegt werden muss.

Maschinen grosser Leistungen werden meist mit zwei Wicklungen pro Phase ausgeführt. In diesem Falle ist es nicht notwendig, das Potential der beiden Generatorsternpunkte getrennt herauszuführen und mit dem eines künstlichen Sternpunktes zu vergleichen. Es kann hier der «Achterschalt» nach Fig. 11 verwendet werden. Jede Wicklungshälfte erhält im Sternpunkt einen Stromwandler (4 in Fig. 11). Ihre Enden werden kreuzweise miteinander verbunden und auf der Seite der Maschinenwicklung einem unverzögert arbeitenden Maximalstromrelais zugeführt. Seine Empfindlichkeit liegt bei etwa 5 % des Stromes einer Wicklungshälfte. Durch die Schaltung bedingt fließen im Normalbetrieb und bei externem Fehler durch die beiden Wicklungshälften gleiche Ströme; das Relais bleibt stromlos. Bei durch einen Windungsschluss erzeugten Ungleichheiten der Strangströme erhält das Relais deren Differenz zugeführt. Die erwähnte hohe Relaisempfindlichkeit ist wegen der Gleichheit der Stromwandler, der gleich langen Wandler-

zuleitungen und der Stabilisierung durch die hohe Relaisimpedanz möglich.

Da der Windungsschlusschutz nur bei kurzschlussartigen internen Generatorfehlern anspricht, ist durch ihn auch der Brandschutz auszulösen.

5.2.2 Reserveschutz, Kurzschlußschutz für externe Fehler

Die beiden im folgenden beschriebenen Schutzeinrichtungen bilden sowohl den Reserveschutz gegen interne und externe Kurzschlüsse als auch den Hauptschutz bei externen Kurzschlüssen in bestimmten Fällen.

Zur näheren Erläuterung dienen die Fig. 12a und b. Als Beispiel wurde eine Generatorstation mit zwei parallelen Gruppen, einer Leitung zur Gegenstation und einer davon abgehenden weiteren Leitung herangezogen. Die Sammelschienen sind jeweils durch einen eigenen Sammelschienenenschutz in Schnellzeit geschützt, die Leitungen durch einen mindestens zweistufigen Distanzschutz. Zur Klarheit der Figur sind die Schutzzonen der parallellaufenden Gruppe nicht eingezeichnet.

5.2.2.1 Minimalimpedanzschutz

Gemäss der Fig. 12 übernimmt der Minimalimpedanzschutz den Reserveschutz für die Sammelschiene der Station und die 1. Stufe des Distanzschutzes der anschliessenden Leitung. In seiner Reichweite wird er analog wie die Distanzschutzrelaisstufen gestaffelt. Je nach Leitungslänge greift er mehr oder minder in die Blocktransformatoren der benachbarten Gruppen. Zeitmässig wird er relativ zur 1. Stufe des Distanzrelais gestaffelt. Dadurch ergibt sich die Selektivität gegenüber dem Distanzschutz. Ist, in nicht empfehlenswerter Weise, kein eigener Sammelschienenenschutz vorhanden, so muss er den Hauptschutz für die Sammelschiene übernehmen.

Die dreiphasige Schaltung zeigt Fig. 13. Das Minimalimpedanzrelais ist ein herkömmliches Waagebalkenrelais: der

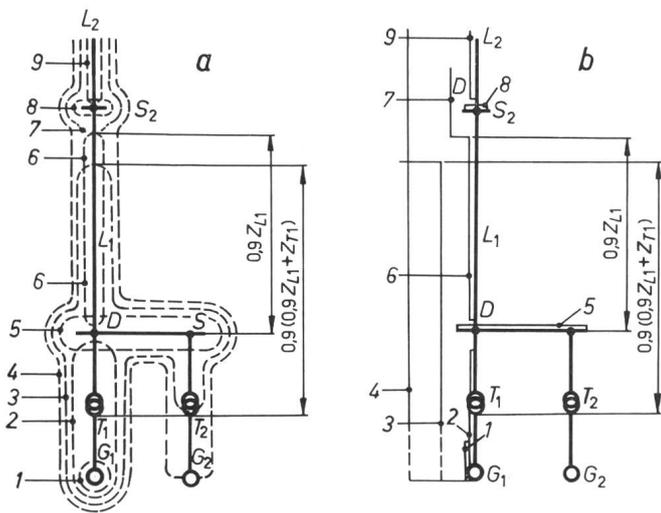


Fig. 12

Kurzschlußschutz einer Generatorstation samt anschliessendem Hochspannungsnetz

a Schutzzonen; b Auslösezeiten

1 Feindifferentialschutz; 2 Grobdifferentialschutz; 3 Minimalimpedanzschutz; 4 Maximalstrom-Zeitschutz; 5, 8 Sammelschienenschutz; 6, 7 Leitung L_1 (6 Distanzschutz: 1. Stufe, 7 Distanzschutz: 2. Stufe); 9 Distanzschutz: 1. Stufe, Leitung L_2 ; G_1 betrachteter Generator; T_1 zugehöriger Blocktransformator; G_2 parallellaufender Generator; T_2 zugehöriger Blocktransformator; L_1, L_2 Leitungen; S_1, S_2 Sammelschienen; D Distanzrelais; Z_{L1} Impedanz der Leitung L_1 ; Z_{T1} Impedanz des Transformators T_1

Strom wirkt in Auslöserichtung, die Spannung in Sperrichtung. Bei Fehlern in der geschützten Zone überwiegt das vom Strom auf den Kontakt ausgeübte Drehmoment und das Relais löst aus.

5.2.2.2 Maximalstrom-Zeitschutz

Der Maximalstrom-Zeitschutz ist die letzte Reserve-schutzeinrichtung, die bei Versagen aller anderen Schutz-einrichtungen eingreift. Sie bildet bei nicht vorhandenem Sammelschienenschutz den lokalen Reserve-Kurzschluss-schutz für die Sammelschiene der eigenen und den entfernten Reserveschutz für die Sammelschiene der gegenüberliegenden Station sowie für die letzten 10 % Länge der anschlies-senden Leitung (L_1 in Fig. 12), die von der 2. Stufe des Distanzschutzes geschützt werden. Die Auslösezeit wird auf die um die Staffelzeit erhöhte längste Auslösezeit der Netz-schutzeinrichtungen eingestellt. Der Auslösestrom wird etwa 50 % über dem Nennstrom des Generators eingestellt; dieser Wert ergibt sich unter Berücksichtigung der nach der relativ langen Auslösezeit wirksam werdenden Synchron-reaktanz und dem Eingreifen des Spannungsreglers. Die bei diesen Relais allfällig vorhandene Momentauslösung ist zu blockieren.

Die verwendeten Schutzrelais haben als Zeitelement einen synchronisierten Ferrarismotor. Im Kurzschlussfalle wird dieser freigegeben und betätigt nach der eingestellten Zeit den Relaiskontakt. Die Maximalstrom-Zeitrelais sollen vor-zugsweise zwecks erhöhter Sicherheit auf eine zweite Lei-stungsschalterspule wirken.

5.3 Stator-Erdschlußschutz

Da die Isolation Wicklungsstab—Statoreisen relativ zur Isolation Wicklungsstab—Wicklungsstab nur halb so stark ist, wird die Wahrscheinlichkeit von Erdschlüssen wesent-lich grösser als die von Kurzschlüssen. Tatsächlich zählen

Erdschlüsse auch zu den am häufigsten beobachteten Fehlern in elektrischen Maschinen.

Bei der in Mitteleuropa üblichen Praxis des hochohmig geerdeten Generatorsternpunktes führt ein Erdschluss im Stator durch die meist in der Grössenordnung von 5...15 A liegenden Fehlerströme nur zu unerheblichen, meist leicht reparierbaren Schäden an der Fehlerstelle. Gravierender jedoch ist, dass bei einem Klemmenerdschluss die gesunden Phasen verkettete Spannung gegen Erde annehmen. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit eines weiteren Erdschlusses einer gesunden Phase stark erhöht, unter Umständen kommt es zu einem Doppelerdschluss mit kurzschlussartigen Strömen und entsprechenden Zerstörungen an den Fehlerstellen

Damit zählt der Erdschlußschutz zu den wichtigsten Schutz-einrichtungen einer Maschine.

5.3.1 Hauptschutz: Statorerdschlußschutz mit 95 % Schutzbereich und Phasenanzeige

Nachfolgend sei der Fall einer Maschine mit gegen Erde isoliertem Sternpunkt betrachtet. Messtechnisch ist bei Erd-schluss vor allem das spannungsmässige Verhalten des Ma-schinensternpunktes interessant. Bei Betrieb mit gesunder Maschine weist er aus Symmetriegründen keine Potential-differenz gegen Erde auf. Im Falle des Klemmenerdschlus-ses nimmt der Sternpunkt gegen Erde die negative Phasen-spannung als Potentialdifferenz an: man sagt, dass eine hun-dertprozentige Sternpunktverlagerung aufgetreten ist. Liegt der Erdschluss näher gegen den Sternpunkt, so wird die Ver-lagerung proportional kleiner; bei z. B. einem Fehler in Wick-lungsmittle beträgt sie nur mehr 50 % usw.

Wird die Spannung zwischen Maschinensternpunkt und Erde durch ein Relais gemessen, so können auf einfache Art Statorerdschlüsse erfasst werden. Fig. 14 zeigt eine Schal-tung mit Anzeige der defekten Phase.

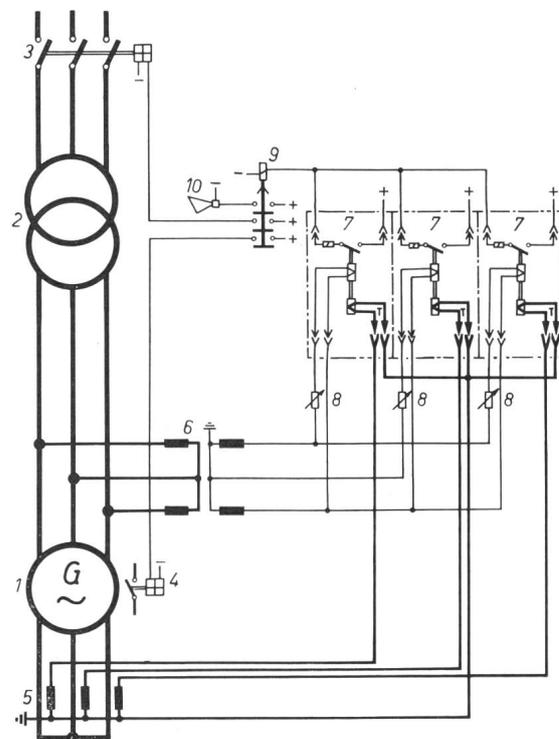


Fig. 13

Minimalimpedanzschutz

1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Entregungs-schalter; 5 Stromwandler; 6 Spannungswandler; 7 Minimalimpedanz-relais; 8 Impedanz-einstellung; 9 Zeitrelais; 10 akustisches Signal

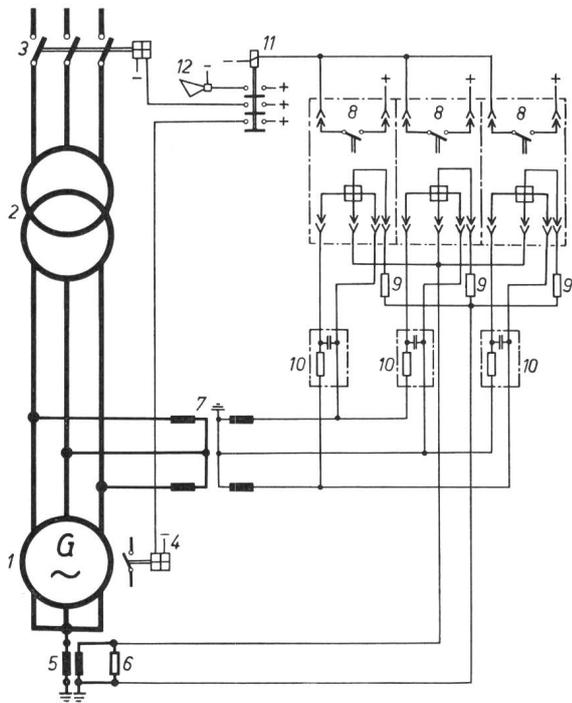


Fig. 14

Statorerdschlußschutz mit 95 % Schutzbereich und Phasenanzeige

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Entregungsschalter; 5 Sternpunkt-Spannungswandler; 6 Erdungswiderstand; 7 Spannungswandler; 8 Statorerdschlußrelais; 9 Vorwiderstand; 10 Abgleichimpedanz; 11 Auslöseschütz; 12 akustisches Signal

Von einem Spannungswandler im Sternpunkt der Maschine wird den Messrelais die Verlagerungsspannung des Sternpunktes zugeführt. Als Messrelais werden Drehspulrelais verwendet; Analog zu den beim Windungsschlußschutz (Abschnitt 5.2.1.2) angeführten Ferrarisrelais bilden Drehspulrelais nur dann ein konstantes, einseitig gerichtetes Drehmoment aus, wenn ihren beiden Spulensystemen Messgrößen gleicher Frequenz zugeführt werden. Bei erdschlussfreier Maschine tritt die in den Phasenspannungen vorhandene 3. Harmonische zwischen Sternpunkt und Erde auf. Über den Sternpunkt-Spannungswandler wird sie dem einen Spulensystem der Relais zugeführt. Dem 2. Spulensystem wird verkettete Spannung zugeführt; da in diesen die 3. Harmonische fehlt, wird im gesunden Zustand der Maschine kein auslösendes Drehmoment auf die Relais ausgeübt. Erst bei Statorerdschluss tritt eine mit Grundfrequenz schwingende und damit auslösende Wechselfspannung sternpunktseitig auf.

Der Schutzbereich der beschriebenen Schaltung beträgt 95 %, d. h. Erdschlüsse ab 5 % Wicklungslänge vom Sternpunkt entfernt werden abgeschaltet. Begrenzt wird der Schutzbereich nicht durch die Empfindlichkeit der Schutzrelais, sondern durch den Erdschlußstrom über die Fehlerstelle. Dieser wird durch die Größe des Erdungswiderstandes (6 in Fig. 14) bestimmt. Der Wert des Erdungswiderstandes selbst ist durch die bei Erdschluss auf der Netzseite des Transformators über seine Wicklungskapazitäten fließenden Ströme und dem Schutzbereich des Relais gegeben. Tritt netzseitig ein Erdschluss auf, so nehmen bei isoliertem netzseitigem Sternpunkt alle Phasenspannungen ein um den negativen Wert der betroffenen Phasenspannung verlagertes Potential gegen Erde an. Dadurch treibt die negative Phasenüberspannung über die Koppelkapazitäten zwischen Ober-

und Unterspannungswicklung des Transformators einen Strom durch die Erdschlussrelais, der sie zum Auslösen bringt. Durch den Erdungswiderstand werden die Relais so stark geschütet, dass der Spannungsabfall dieses Stromes kleiner als die Relaisansprechspannung wird. Dadurch ist die Selektivität des Schutzes gewährleistet.

Zu bemerken ist noch, dass der Statorerdschlußschutz, da er nur die Verlagerungsspannung des Sternpunktes misst, alle galvanisch mit dem Generator verbundenen Anlageteile schützt. Insbesondere also die generatorseitigen Wicklungen des Transformators (allfällig auch eines Eigenverbrauchs-Transformators). Da der Blocktransformator normalerweise generatorseitig im Dreieck geschaltet ist, wird diese Wicklung zu 100 % ihrer Länge geschützt.

5.4.2 Reserveschutz: Statorerdschlußschutz mit 90 % Schutzbereich

Wie eingangs erwähnt, gehören Statorerdschlüsse zu den am häufigsten auftretenden Fehlern. Ein Reserveschutz für Erdschlüsse ist bei grossen Generatoren daher unbedingt erforderlich.

Eine einfache Schutzeinrichtung dieser Art zeigt Fig. 15. Es wird nur ein Maximalspannungsrelais verwendet, so dass eine Phasenanzeige entfällt. Das Relais 7 bildet mit der Induktivität seiner Spule und dem vorgeschalteten Kondensator einen Filterkreis, der praktisch alle höheren Harmonischen sperrt. Durch die nichtlineare Abhängigkeit der Induktivität der Relaispule von der angelegten Spannung wird der Kreis «Spuleninduktivität—Kondensator» derart verstimmt, dass das Relais gegebenenfalls dauernd 100 % Verlagerungsspannung aushält bei einem minimalen Ansprechwert von 10 %; diese Lösung kann bei kleineren Einheiten interessant sein, wo dieser Schutz auf Signalisierung arbeitet. Er kann an den gleichen Sternpunkt-Spannungswandler und Erdungswiderstand wie der Hauptschutz angeschlossen werden.

5.3.3 Statorerdschlußüberwachung mit 100 % Schutzbereich

Erdschlüsse in der Nähe des Sternpunktes haben wegen der niedrigen Spannungen der betroffenen Wicklungspartien eine geringe Wahrscheinlichkeit. Die direkten Folgen sind

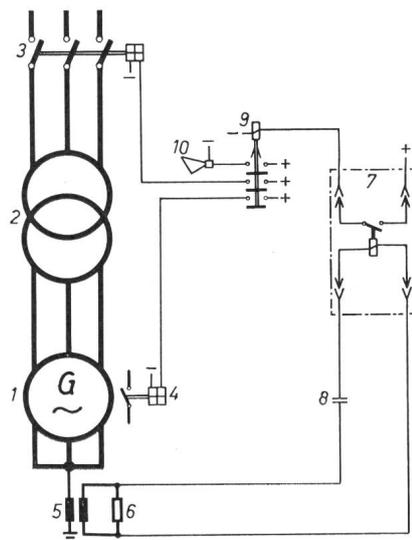


Fig. 15

Statorerdschlußschutz mit 90 % Schutzbereich

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Entregungsschalter; 5 Sternpunkt-Spannungswandler; 6 Erdungswiderstand; 7 Statorerdschlußrelais; 8 Kondensator; 9 Zeitrelais; 10 akustisches Signal

ebenfalls unbedeutend, da insbesondere die dabei auftretende Verlagerungsspannung klein ist. Aus diesen Gründen wird für den Sternpunkt und seine Umgebung nur eine Erdschlußsignalisierung vorgesehen; diese erlaubt es dem Betriebspersonal, die Maschine in Schwachlastzeiten zur Lokalisierung und fallweisen Beseitigung des Fehlers aus dem Betrieb zu nehmen.

Die Schaltung der Statorerdschlussüberwachung mit 100 % Schutzbereich zeigt Fig. 16. Von einer Wechselspan-

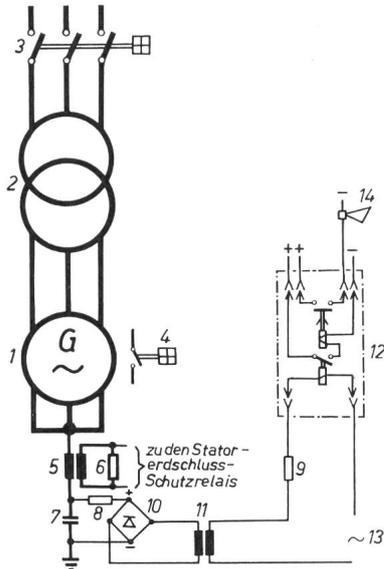


Fig. 16

Statorerdschlussüberwachung mit 100 % Schutzbereich

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Entregelungsschalter; 5 Sternpunkt-Spannungswandler; 6 Erdungswiderstand; 7 Kondensator; 8, 9 Vorwiderstände; 10 Gleichrichterbrücke; 11 Spannungswandler; 12 Statorerdschluss-Überwachungsrelais; 13 Wechselspannungsquelle; 14 akustisches Signal

nungsquelle 13 wird über einen Hilfsspannungswandler 11 und eine Gleichrichterbrücke 10 an den Generator transformatorisch eine kleine Gleichspannungsverlagerung geschaltet. Durch einen Kondensator 7 wird die Gleichspannung gegen Erde gesperrt. Für Wechselspannung ist der Kondensator durchlässig, so dass der im Abschnitt 5.3.1 beschriebene, bei Netzerdschluss auftretende Strom, ohne unzulässige Spannungserhöhungen, gegen Erde abfließen kann.

Auf der Primärseite des Spannungswandlers 11 ist ein Maximalstromrelais in den Kreis geschaltet.

Tritt im Generatorsternpunkt oder irgendeinem galvanisch damit verbundenen Anlageteil auf der positiven Klemme des Gleichrichters 10 ein Erdschluss auf, so ergibt sich für den Gleichstrom ein geschlossener Kreis, so dass das Erdschlussüberwachungsrelais anziehen und zeitverzögert den Fehler melden kann.

Eine Gefahr der Ferroresonanz ist nicht gegeben, da der Erdungswiderstand 6 des Statorerdschlussschutzes durch seine Niederohmigkeit alle derartigen Erscheinungen dämpft.

5.5 Spannungsschutz

5.4.1 Maximalspannungsschutz

Unzulässige Spannungserhöhungen über die Maschinenwicklungen können zu Erd- und Kurzschlüssen mit allen ihren Folgen führen. Der Maximalspannungsschutz hat die Aufgabe, vor dem Überschreiten der zulässigen Spannungswerte einzugreifen. Gegen Überdrehzahl (Druchbrennen)

der Maschine ist er nicht in allen Fällen geeignet, da bei schnellen Reglern bei Drehzahlerhöhung die Spannung hinreichend konstant gehalten wird.

In der Praxis treten Überspannungen meist in folgenden Fällen auf: bei Lastabwurf mit anschließendem drehzahlmässigem Durchgehen der Maschine, bei Versagen des Spannungsreglers und bei Selbsterregung. Des weiteren kommt es noch bei betriebsmässigen Lastabschaltungen zu transienten Spannungsspitzen. Diese betragen etwa 1,2... 1,3mal die Nennspannung. Kurzzeitig sind sie ohne weiteres zulässig, auf die Dauer gefährden sie jedoch die Maschine.

Der Schutz selbst wird zweistufig angelegt: die 1. Stufe mit niedrigem Ansprechniveau löst verzögert, die 2. Stufe mit höherem Ansprechniveau momentan aus. Durch die Verzögerung der 1. Ansprechstufe werden Fehlauflösungen bei betriebsmässigen Lastabschaltungen und gleichzeitigen Überspannungen verhindert.

Das Maximalspannungsrelais soll nicht an den gleichen Spannungswandler wie der Regler angeschlossen werden. Andernfalls wird es bei einem Versagen des Spannungsreglers durch z. B. Sicherheitsausfall ebenfalls ausser Betrieb gesetzt.

5.4.2 Selbsterrungsschutz [5]

Wird ein Schenkelpolgenerator kapazitiv belastet, so kann er so lange stabil in Betrieb gehalten werden, bis dass die Reaktanz X_C der kapazitiven Belastung grösser als die Längsreaktanz X_L des Generators wird. Sind die beiden Reaktanzen gleich, so wird der Erregerstrom null; wird X_C noch kleiner gemacht, wird der Erregerstrom negativ und es tritt Selbsterregung auf; durch einen schnellen Spannungsregler kann jedoch bis zu $X_C > X_q$ (Querreaktanz) noch ein stabiler Betrieb erreicht werden. Wird X_C noch kleiner, so können die Folgen der Selbsterregung nicht mehr verhindert werden: die Maschine kippt, d. h. sie schlüpft um eine Polteilung. Die Regelung arbeitet dann verkehrt und es können gefährliche

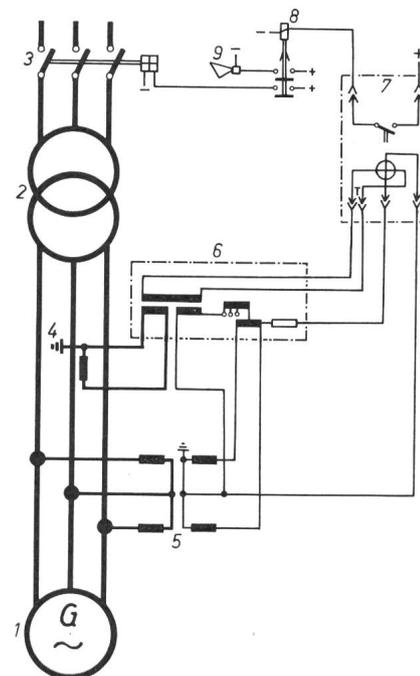


Fig. 17

Selbsterregungsschutz

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leistungsschalter; 4 Stromwandler; 5 Spannungswandler; 6 Anschlussgerät; 7 Selbsterregungsschutzrelais; 8 Auslöseschütz; 9 akustisches Signal

Spannungen auftreten, welche nur durch die Sättigung von Transformator und Maschine begrenzt sind [6]. Da die Sättigung bei Synchronmaschinen durch ihren relativ grossen Luftspalt erst spät einsetzt, treten durch die Selbsterregung erhebliche Überspannungen auf.

Bei Turbogeneratoren ist eine kapazitive Belastung mit negativer Erregung aus Stabilitätsgründen nicht möglich.

Der im folgenden beschriebene Selbsterregungsschutz nach Fig. 17 schaltet die Maschine bereits vor der Ausbildung gefährlicher Überspannungen ab. Er vergleicht die Reaktanz X_C der kapazitiven Belastung mit der Querreaktanz X_q der Maschine. Im Abgleichgerät δ wird die Differenz zwischen dem Generatorstrom und einem Vergleichsstrom gebildet. Der Vergleichsstrom ist der Spannung proportional und ist durch eine anzapfbare Drosselspule eingestellt. Diese Spule ist das Abbild der Querreaktanz des Generators. Die Differenz der beiden Ströme wird dem Schutzrelais, einem Ferrarisrelais, zugeführt. Durch die Art der Polarisierung und richtungsabhängigen Charakteristik kann es die Richtung des Differenzstromes feststellen. Bei kleiner kapazitiver Belastungsreaktanz überwiegt der Strom durch die Abbild-drosselspule und der Kontakt schliesst in Sperrichtung. Bei grosser kapazitiver Belastungsreaktanz kehrt der dem Relais

zugeführte Differenzstrom sein Vorzeichen um und das Relais schaltet ab. Die Messung erfolgt sowohl spannungs- als auch frequenzunabhängig. Da es sich um eine äussere Störung handelt, genügt es, den Leistungsschalter zu betätigen.

Bei Blockschaltungen ist für die Einstellung die Transformatorreaktanz zu berücksichtigen. Arbeiten zwei oder mehr Generatoren parallel, so können die Schutzeinrichtungen pro Dreiergruppe von Generatoren gemeinsam ausgeführt werden.

Literatur

- [1] A. Kolar: Statische Transistor-Schutzrelais und elektronische Schutzeinrichtungen. Bull. Oerlikon -(1965)362, S. 1...14.
- [2] C. Bodmer: Die Lebensdauer veränderlich belasteter Maschinen und Apparate. Bull. Oerlikon -(1952)293, S. 25...30.
- [3] P. Lauper: Ein statisches, einschaltssicheres Prozent-Differentialstromrelais für Transformatoren. Bull. Oerlikon -(1963)352, S. 8...17.
- [4] E. Bopp: Windungsschlußschutz für Generatoren. Siemens Z. 16(1936)12, S. 492...496.
- [5] P. Lauper: Schutz gegen Selbsterregung von kapazitiv belasteten Synchronmaschinen. Bull. Oerlikon -(1957)322, S. 45...49.
- [6] H. Bühler: Die theoretischen Grundlagen des Modells einer Synchronmaschine mit Blindlast zur Untersuchung von Spannungsregelungen. Bull. Oerlikon -(1956)315, S. 26...39.

Adresse des Autors:

A. Kolar, Ingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, Postfach, 8050 Zürich.

Fahren mit Standlicht

Juristische Aspekte

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung der SBK vom 6. April 1965 in Bern,

von A. Pfister, Bern

656.057.883

1. Technik und Recht ¹⁾

Ob und wann mit dem Standlicht gefahren werden soll, ist zuerst eine technische, nur indirekt eine rechtliche Frage. Das Verkehrsrecht kennt den Grundsatz: «Sehen und gesehen werden; nicht blenden» ²⁾. Aber dieses Prinzip sagt noch nicht, welches Licht in einem bestimmten Fall zu wählen ist. Übrigens steht das «Nichtblenden» in einem gewissen Gegensatz zu «Sehen und gesehen werden».

Juristische Überlegungen helfen nicht weiter, namentlich nicht eine Wortinterpretation: Es ist ja paradox, dass man mit dem «Standlicht» (für stehende Fahrzeuge) fahren soll, weil die «Abblendlichter» ihrem Namen zum Trotz nicht selten blenden. Auch die Lebenserfahrung des «bonus pater familias», die dem Recht so oft den Weg weist, lässt uns im Stich: Unter den Strassenbenützern sind die Meinungen über das beste Licht sehr geteilt. Selbst das Beispiel ausländischer Verkehrsgesetze ist unzuverlässig. Fragt man, warum in den USA das Fahren mit Standlicht nicht üblich oder gar untersagt ist, so antwortet der Beleuchtungsfachmann, dass die Fahrzeuglichter mit den Strassenlampen harmonieren

¹⁾ Abkürzungen:

BGE = Entscheidungen des Schweiz. Bundesgerichts, Amtliche Sammlung.

BRB = Bundesratsbeschluss.

EJPD = Eidg. Justiz- und Polizeidepartement.

MFV = Vollziehungsverordnung vom 25. 11. 1932 zum Motorfahrzeuggesetz.

StGB = Schweiz. Strafgesetzbuch.

SVG = Strassenverkehrsgesetz vom 19. 12. 1958.

VRV = Verordnung über die Strassenverkehrsregeln vom 13. 11. 1962.

²⁾ Handbuch der Verkehrsregeln, hg. vom Eidg. Justiz- und Polizeidepartement, Regel 94.

sollten und die amerikanische Strassenbeleuchtung nicht für das Fahren mit Standlichtern geschaffen sei ³⁾.

Obwohl in erster Linie die Beleuchtungswissenschaft zuständig ist, bleibt dem Recht die Entscheidung nicht erspart. Es folgt gern dem Gutachten der Fachleute und wünscht nur, dass die Fachleute in ihrem Urteil einig sind.

2. Die Vorschriften über das Fahren mit Standlichtern

Der Gedanke, auf gut beleuchteten Strassen mit dem Standlicht zu fahren, ist alt. Er soll in New York schon in den Zwanzigerjahren einmal erprobt, aber wegen schlechter Erfahrungen aufgegeben worden sein ⁴⁾. In Europa hatte Italien seit dem 30. Mai 1936 ein Regierungsdekret, wonach die Motorfahrzeugführer auf gut beleuchteten Strassen innerorts die Stand- und Schlusslichter einschalten mussten ⁵⁾. Möglicherweise erliessen andere Staaten um die gleiche Zeit ähnliche Vorschriften. In der Schweiz entwarf das EJPD im Jahre 1937 eine Verordnung über den Innerortsverkehr, welche u. a. vorsah, dass bei guter öffentlicher Beleuchtung mit den Standlichtern gefahren werden müsse. Die Verordnung ist aus äusseren Gründen nicht zustande gekommen; die fragliche Vorschrift war nicht auf Opposition gestossen. Das EJPD konnte vielmehr im Dezember 1937 in einem Brief an eine kantonale Staatsanwaltschaft schreiben, das Fahren

³⁾ vgl. Balder: Feux position sur les routes bien éclairées. Revue internationale de la Circulation et de la Sécurité Routière, 1957, N° 2, p. 27.

⁴⁾ Mitteilung von O. Keller, Verkehrsingenieur, Stadtpolizei Lausanne.

⁵⁾ vgl. Rivista giuridica della circolazione e dei trasporti, Roma, 1958, p. 431.