Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 24 (1933)

Heft: 23

Artikel: Der Kurzschluss-Schutz von Wechselstromnetzen [Fortsetzung und Schluss]

Autor: Courvoisier, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057264

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A., Zurich 4
Stauffacherquai 36/38

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXIVe Année | N° 23 | Vendredi, 10 Novembre 1933

Der Kurzschluss-Schutz von Wechselstromnetzen.

Umgearbeitete Fassung der von der Denzler-Stiftung prämiierten Konkurrenzarbeit von *G. Courvoisier*, Baden.

(Fortsetzung von Seite 475 und Schluss.)

621.3.014.3 : 621.316.92

II. Der Kurzschluss-Schutz.

A. Grundlegende Betrachtungen.

Jede allgemeine Untersuchung über Störungen hat Erscheinungen, Ursachen und Auswirkungen in Betracht zu ziehen. Die kritische Sichtung der Erscheinungen führt zur Zusammenfassung verschiedener Störungsformen in Gruppen mit gemeinsamem Grundcharakter und zur Kennzeichnung derjenigen Erscheinungen, welche innerhalb der Gruppen für die einzelnen Störungsformen typisch sind. Aus der Gruppenbildung ergeben sich klar abgegrenzte Aufgabengebiete für die Störungsbekämpfung und aus der Kenntnis der typischen Erscheinungen in ihnen die nötigen Anhaltspunkte für die Ausbildung der Organe, welche den Eintritt eines Störungszustandes zu erfassen haben. Der Ueberblick über die Störungsursachen ermöglicht ein Urteil darüber, ob und wie weit der Eintritt bestimmter Störungen durch vorbeugende Massnahmen verhindert werden kann. Die Kenntnis der möglichen Störungsauswirkungen führt zur Formulierung der Anforderungen, welche man an diejenigen Schutzeinrichtungen zu stellen hat, die nach Eintritt einer Störung einzugreifen haben.

Wir beschränken die vorliegende Untersuchung auf die Betrachtung kurzschlussartiger Störungen in Dreiphasen-Leitungznetzen. Ueber ihre Erscheinungsformen ist kurz folgendes zu sagen. Kurzschlüsse sind Störungen, bei denen an der Störungsstelle die betriebsmässige Isolation zwischen benachbarten Phasenleitern oder zwischen einem Phasenleiter und Erde resp. einem Nulleiter leitend überbrückt wird. Dabei wird ein Stromkreis geschlossen, welcher keine Nutzlast enthält und oft so kleine Impedanz aufweist, dass heftige Ueberströme, verglichen mit den normalen Betriebsströmen der betroffenen Netzteile, den Kurzschlußstromkreis durchfliessen. An der Kurzschlußstelle bricht die Spannung zwischen den Störungsphasen auf einen kleinen Betrag zusammen; sie steigt von dort aus gegen die Generatoren und eventuell die Verbraucher hin allmählich an. Die Spannungs- und Stromverhältnisse, welche sich in einem Netz als unmittelbare Folge eines Kurzschlusses einstellen, werden durch Kurzschlussform, räumliche Lage der Störungsstelle, Netzgestalt und Maschineneinsatz bedingt. Ihre typische Gestaltung in den Störungen, welche in den Kreis unserer Betrachtungen fallen, nämlich bei drei- und zweipoligen isolierten Kurzschlüssen, Erdschlüssen, zweipoligen Kurzschlüssen mit Uebergriff auf Erde und Doppelerdschlüssen, wurde im ersten Hauptteil unserer Studie eingehend beschrieben.

Gewöhnlich wird die Kurzschlussverbindung durch einen Lichtbogen gebildet. Ein solcher zeichnet sich durch hohe Wärmeentwicklung und grosse Beweglichkeit aus. Metallische Kurzschlüsse können sich durch ihre elektrischen Rückwirkungen allein bemerkbar machen; nachträglich sind gelegentlich Verschweissungen an der Störungsstelle zu beobachten. In schweren Fällen treten lokale mechanische Zerstörungen unter der dynamischen Wirkung der Kurzschlußströme auf. Erfolgt ein Schluss gegen Erde, so führt die Kurzschlussverbindung über den Erdungswiderstand an der Störungsstelle; dessen Betrag kann je nach der Ausführung der Erdung und den Geländeverhältnissen in weiten Grenzen schwanken. Unter Umständen ist seine Rückwirkung auf die Spannungs- und Stromverhältnisse, welche sich im gestörten Netz ausbilden, ganz erheblich. Der Spannungsabfall des Erdschlußstromes im Erdungswiderstand gefährdet Personen, welche die Erdleitung oder leitend damit verbundene Metallteile berühren und auf dem Erdboden stehen. Für Personen, die in der Nähe der Erdschlußstelle auf dem Boden liegen, besonders aber für vierfüssige Tiere können die sogenannten Schrittspannungen gefährlich werden; dies sind bekanntlich Spannungsdifferenzen, welche auf kurze Distanz, beispielsweise Schrittlänge, an der Erdoberfläche in unmittelbarer Nähe einer Erdelektrode und besonders neben der Eintrittsstelle ihrer Zuleitung in den Boden auftreten, sobald die Erdung Strom führt.

Zur Frage der Ursachen von Kurzschlußstörungen in Hochspannungsnetzen können wir uns kurz fassen. Schon ein Hinweis auf die wichtigsten

Gruppen, in die sie sich einordnen lassen, nämlich

atmosphärische Erscheinungen,
Material- und Konstruktionsfehler,
menschliche und tierische Eingriffe,

lässt erkennen, dass durch vorbeugende Massnahmen in ökonomisch zulässigen Grenzen die Zahl der Kurzschlüsse wohl begrenzt, ihr Auftreten jedoch nicht völlig verhindert werden kann. Im einzelnen sei kurz auf folgendes hingewiesen:

Unter den atmosphärischen Kurzschlusserregern bilden die direkten Blitzschläge in Leitungen und Maste, vielleicht auch die sogenannten indirekten Blitzschläge, die grösste Gefahr für Freileitungen. Rauhreifbildungen können wohl meistens im Zusammenhang mit Material- und Konstruktionsmängeln zum Zusammenschnellen der Leitungen und besonders bei Sturm zu Leitungs-, Isolator- und gar Mastbrüchen führen. Heftige Stürme können dadurch Kurzschlüsse verursachen, dass sie Gegenstände, wie nasse Aeste, in die Leitungen hineintreiben. Kabeldefekte sind meistens auf Material- oder Konstruktionsmängel zurückzuführen.

Zu den menschlichen Eingriffen, welche Kurzschlüsse verursachen, gehören Bedienungsfehler, besonders das Oeffnen von laststromführenden Trennern und das Schliessen von Erdungstrennern auf Leitungen, welche unter Spannung stehen, sodann fahrlässige oder böswillige Beschädigungen von Leitungen, beispielsweise durch Fällen von Bäumen in der Nähe der Leitungen, durch Pickelschläge in Kabel, durch Ueberwerfen von Drähten über Leitungen usw. Berüchtigt ist die Einleitung von Kurzschlüssen durch Vögel bei Freileitungen, welche auf Stützisolatoren verlegt sind.

Betriebserfahrungen und systematische Untersuchungen haben gelehrt, manche Störungsursachen bei Neuanlagen auszuschalten und ihre Bedeutung für bestehende Netze zu begrenzen. Durch intensive Entwicklungsarbeiten der konstruierenden Firmen, durch Normalisierungsarbeiten auf nationalem und internationalem Boden und durch die Aufstellung scharfer Prüfvorschriften ist heute für die verschiedensten Konstruktionsgebiete ein so hoher Standard geschaffen worden, dass Material- und Konstruktionsmängel zusehends an Bedeutung verlieren. Trotzdem ist klar, dass man nach wie vor mit Kurzschlüssen als einem unvermeidlichen Betriebsrisiko ökonomisch gebauter Netze zu rechnen hat. Kurzschlußschutzeinrichtungen dürften daher den Charakter lebenswichtiger Betriebsorgane behalten.

Bei den Folgen der Kurzschlüsse sind zwei Gruppen zu unterscheiden, nämlich die Zerstörungserscheinungen an der Kurzschlußstelle selbst und die Auswirkungen im Netz.

Die Wärmeentwicklung der Kurzschlusslichtbogen dürfte im allgemeinen für Freileitungen von untergeordneter Bedeutung sein; sie kann allerdings gelegentlich zu solcher Beschädigung der Isolatoren oder Leiter führen, dass die gestörte Leitung ausser Betrieb genommen werden muss, bis der Schaden repariert ist. Freileitungen können oft nach dem Abschalten eines Kurzschlusses ohne weiteres wieder in Betrieb genommen werden. Im Gegensatz dazu sind die Beschädigungen an Kabeln durch die Lichtbogenwärme stets erheblich. Dies ist insofern von untergeordneter Bedeutung, als Kabelkurzschlüsse immer durch einen Defekt eingeleitet werden, die Kabel daher ohnehin repariert und bis dahin ausser Betrieb genommen werden müssen. Eine sehr unangenehme Lichtbogenwirkung ist bei Mehrphasenkabeln die Zerstörung der Isolation zwischen benachbarten Phasen und damit der sukzessive Uebergang von Erdschlüssen in zweipolige Kurzschlüsse resp. von solchen in dreipolige; dies ist stets gleichbedeutend mit dem Uebergang einer leichteren in eine schwerere Kurzschlussart. Nicht unbedenklich ist auch die teilweise Vergasung der meist organischen Kabelisolationsstoffe durch den Lichtbogen und die Bildung explosibler Gasgemische.

Die Beweglichkeit der Lichtbogen tritt vornehmlich bei Freileitungen als bedeutsame Eigenschaft hervor. In günstigen Fällen führt das allmähliche durch Wind, Wärmeauftrieb und magnetische Wirkungen bedingte Anwachsen ihrer räumlichen Ausdehnung zu solcher Widerstandssteigerung, dass der Kurzschlußstrom auf einen kleinen Betrag reduziert wird, der Lichtbogen erlischt und der Kurzschluss ohne Schalterauslösung verschwindet; so wurde bei Kurzschlussversuchen in einem grossen 110 kV-Netz ein Lichtbogenkurzschluss beobachtet, der in drei Sekunden von selbst erlöscht ist, und ein zweiter, dessen Widerstand in der gleichen Zeit von ca. 15 auf 1700 Ohm gestiegen ist. Häufiger tritt jedoch der Fall ein, dass ein Lichtbogen auf Leiter gesunder Phasen hingetrieben wird und dass sich so die Störungsform im Verlaufe der Störung ändert; bei Doppelleitungen, welche auf gleichem Gestänge geführt werden, kann es geschehen, dass eine Kurzschlußstörung des einen Stranges auf den andern übergreift.

Die Auswirkungen einer Störung im Netz sind teilweise Erscheinungen, welche unmittelbar mit der Störung selber zusammenhängen, und teilweise solche, die sich als Folge von Schalterauslösungen ergeben, welche ihrerseits vom Kurzschlußschutz verursacht werden. Die unmittelbaren Kurzschlusswirkungen hängen mit dem Zusammenbrechen der Spannungen und der plötzlichen Aenderung der Belastungsverhältnisse zusammen. Sie machen sich bei den Verbrauchern vornehmlich durch ein Verlöschen der Beleuchtung und eventuell durch ein «Kippen» der Motoren bemerkbar. In den Kraftwerken verursachen sie je nach Umständen eine plötzliche Belastung oder Entlastung der Generatoren und entsprechende Beschleunigungserscheinungen an ihnen. Laufen mehrere Kraftwerke parallel, so kann es sehr wohl geschehen, dass durch einen Kurzschluss die einen belastet und die andern entlastet werden. Dies bewirkt unfehlbar ein Auseinanderlaufen der verschiedenen Werke, die Einleitung von Ausgleichsvorgängen und Pendelungen; im schlimmsten Falle erfolgt ein Ausser-Tritt-Fallen. Der Verlauf dieser Vorgänge hängt von vielen

Faktoren, wie Netzgestaltung, Lage, Anzahl und Belastung der speisenden Werke unmittelbar vor der Störung, Bauart der Generatoren, Art und Regelcharakteristik ihrer Antriebsmaschinen und endlich von der Lage der Störungsstelle im Netz sowie von der Störungsart ab. Hinsichtlich der Bedeutung, welche die Störungsart in diesem Zusammenhang hat, kann man die Regel aussprechen, dass eine Kurzschlußstörung um so empfindlicher in das Gleichgewicht eines Netzes eingreift, je mehr Phasen sie erfasst. Beispielsweise macht sich ein Erdschluss in einem Netz mit isoliertem Nullpunkt resp. mit Löschspulenschutz sozusagen nur durch die Tätigkeit von Instrumenten bemerkbar, welche von der Spannung der Phasen resp. des Netznullpunktes gegen Erde oder vom Spulenstrom der Löschspulen gespeist werden; ein dreipoliger Kurzschluss dagegen, welcher auf einer Verbindung zwischen zwei Kraftwerken erfolgt, kann den Austausch synchronisierender Energie zwischen beiden praktisch vollkommen unterbinden, so dass ein Ausser-Tritt-Fallen nach kurzer Zeit unvermeidbar wird.

Die mittelbare Auswirkung einer Kurzschlussstörung in einem Netz, d. h. die Folge der Schalterauslösungen durch den Kurzschlußschutz, ist die vorübergehende Abtrennung einer Netzpartie um die Kurzschlußstelle herum von den Stromquellen. Es ist klar, dass man das grösste Interesse daran hat, deren Ausdehnung so klein wie irgendwie möglich zu halten; bei Störungen auf einer Leitung sollten nur die Schalter unterbrechen, welche an Anfang und Ende des störungsbehafteten Leitungsabschnittes liegen und bei Sammelschienenstörungen nur die Schalter am Anfange der Leitungsabschnitte, über welche die betreffende Sammelschiene unmittelbar gespeist wird.

Eine betriebstechnisch wichtige Aufgabe ist die Aufrechterhaltung der Energieversorgung wirtschaftlich bedeutsamer Verbraucher durch genügend leistungsfähige Kraftwerke nach der Abschaltung von Kurzschlüssen. Ihre Lösung ist nicht Sache des Kurzschlußschutzes selber; vielmehr muss von vornherein durch zweckmässige Anlage der Netze und entsprechende Betriebsführung dafür gesorgt werden, dass trotz des Ausfallens eines beliebigen kranken Leitungsabschnittes eine genügende Verbindung zwischen Stromquelle und Verbraucher bestehen bleibt. Einer klaren Vorbereitung bedarf auch die planmässige Auftrennung mehrfach gespeister Netze für den Fall, dass die Kraftwerke gegeneinander ausser Tritt fallen.

Diese Betrachtungen führen unmittelbar zur Formulierung der Bedingungen, welche ein gutes Kurzschlußschutzsystem erfüllen muss. Wir möchten sie schlagwortartig folgendermassen kennzeichnen:

1. Sicherheit.
   a) Arbeitsfähigkeit für alle Störungsformen.
   b) Arbeitsfähigkeit unter allen Betriebsverhältnissen.
   c) Schutzreserve.
   d) Periodische Prüfbarkeit.
2. Selektivität.
3. Raschheit.
4. Unempfindlichkeit für nicht kurzschlussartige Störungen.
5. Gültigkeit der Relaiseinstellungen für alle Betriebsverhältnisse.
6. Einheitlichkeit der Ausrüstungen eines Netzes; Möglichkeit, identische Ausrüstungen bei beliebigem Ausbau zu verwenden.
7. Distanzanzeige.

Zu dieser Aufzählung sind folgende Bemerkungen zu machen.

Die erste Forderung erscheint selbstverständlich. Es ist jedoch nicht überflüssig, auf die besonderen Gesichtspunkte hinzuweisen, unter denen sie betrachtet werden muss.

Konstruktive und fabrikatorische Zuverlässigkeit der verwendeten Apparate ist eine Grundbedingung; Einfachheit ihres Aufbaues und der zugehörigen Schaltungen hat grösste Bedeutung. Nicht zu unterschätzen sind Einfachheit und Verständlichkeit des Schutzprinzipes.

Ein Schutzsystem ist ungenügend, wenn es nicht alle Störungsformen erfasst, welche in einem Netz auftreten können und eine rasche automatische Abschaltung erheischen.

Die Arbeitsweise eines Schutzsystemes soll von den Betriebsverhältnissen des Netzes unmittelbar vor einer Störung unabhängig sein. So soll es besonders auch bei Schwachlastbetrieb, wie er beispielsweise Sonntags auftritt, voll arbeitsfähig bleiben, trotzdem dabei Störungsströme auftreten können, welche erheblich unter dem Normalstrom der Netzstellen liegen, an welchen die Abschaltung erfolgen soll.

Versagt einmal die Auslösung eines Schalters, welcher mit Rücksicht auf die Lage der Kurzschlußstelle in erster Linie unterbrechen sollte, so sollen die Schutzeinrichtungen derjenigen Teilstrecken eingreifen, welche entgegen der Flussrichtung der Kurzschlussenergie betrachtet, unmittelbar an den defekten Leitungsabschnitt angrenzen. Die einzelnen Schutzeinrichtungen sollen somit zueinander in Reserve liegen. Auf keinen Fall darf es vorkommen, dass wegen des Versagens eines Elementes an einer Schaltstelle ein Kurzschluss überhaupt nicht automatisch abgeschaltet wird.

Es soll prinzipiell die Möglichkeit bestehen, am Einbauort die Arbeitsfähigkeit und richtige Zusammenarbeit aller Organe einer Schutzeinrichtung ohne erheblichen Eingriff in die betriebsmässigen Verbindungen mit Hilfe transportabler Prüfapparaturen periodisch zu kontrollieren. Die Ueberwachung laufender Maschinen gilt als selbstverständlich; bei Organen, deren ständige Bereitschaft und Zuverlässigkeit für die Kontinuität eines Betriebes so bedeutsam ist, sollte eine richtige Wartung mindestens ebenso nahe liegen.

Unter Selektivität versteht man die Fähigkeit eines Schutzsystemes, die Netzpartie, welche im

Gefolge eines Kurzschlusses automatisch abgeschaltet wird, auf ein Minimum zu beschränken. Dabei muss auf drei Gefahrquellen für die Selektivität hingewiesen werden, welche leicht übersehen werden. Die eine ist ein Wechsel der Kurzschlussform während des Störungsverlaufes; ihre Ursache ist gewöhnlich das Uebergreifen des Kurzschlusslichtbogens auf gesunde Phasen oder nach Erde. Die zweite tritt bei zweiseitig gespeisten Kurzschlüssen in Erscheinung und äussert sich als sprungweise Aenderung von Impedanz und Energierichtung, wenn der erste der Schalter an den beiden Enden des kranken Leitungsabschnittes unterbricht. Schliesslich muss bei gewissen Schutzsystemen darauf Rücksicht genommen werden, dass bei Kurzschlüssen in vermaschten Netzen Leitungsabschnitte, welche nicht im Zuge der hauptsächlichen Kurzschlußstrombahnen liegen, so kleine Ströme führen, dass der Strom- oder Leistungsbereich, in dem die verwendeten Relais richtig arbeiten, mehr oder weniger eindeutig unterschritten wird; dies kann unter Umständen zu Fehlauslösungen führen.

Umstrittenes Gebiet ist die Frage der zulässigen Kurzschlussdauer. Einerseits bildet die sogenannte Zeitstaffelung, trotzdem sie zu verhältnismässig langen Abschaltzeiten führt, ein beliebtes Selektiermittel, denn sie ermöglicht die Verwendung einfacher Schutzmethoden und -apparaturen. Anderseits ist eine möglichst weitgehende Kürzung der Kurzschlussdauer in wenig stabilen Netzen einfach nicht zu umgehen; denn die Gefahr des Ausser-Tritt-Fallens wächst dort mit der Störungszeit. Dazu bietet die Beschleunigung der Abschaltungen Vorteile, wie Beschränkung der Zerstörungen an der Kurzschlußstelle, vermindertes Risiko für einen Wechsel der Kurzschlussform während der Störungsdauer und erhöhte Klarheit der Strom- und Spannungsverhältnisse im Schaltmoment; Lichtbogenwiderstand und Ausgleichströme zwischen parallel laufenden Kraftwerken können das typische Störungsbild um so weniger verwischen, je weniger Zeit vom Eintritt der Störung bis zum Eingreifen der Schutzeinrichtung verstreicht. Eine untere Grenze dürfte der Abschaltzeit durch die Bedingung gesetzt sein, dass die Schutzeinrichtungen durch die stossartigen Vorgänge, welche sich beim Leereinschalten von Transformatoren und Kabeln einstellen, nicht zu Fehlwirkungen angeregt werden dürfen.

Die Ergebnisse von Kurzschlussversuchen in verschiedenen Netzen legen die Auffassung nahe, dass Einheiten, welche überhaupt ausser Tritt fallen, bereits nach etwa 0,5 Sekunden zum Rest der Energieerzeuger in Opposition stehen. Will man daher einen Schutz schaffen, der solche Vorgänge verhindert, so muss man dafür sorgen, dass er mindestens die schweren Kurzschlussformen in 0,2 Sekunden herausschaltet. So etwas bedingt nicht nur die Verwendung eines schnellwirkenden Schutzes, sondern auch entsprechender Schalter.

Nach der Literatur zu schliessen, sind derartige Einrichtungen in den USA bereits mit Erfolg in Betrieb genommen worden. In England wird die Bedeutung rascher Kurzschlussabschaltung schon lange betont; man hat deshalb dort den Differentialschutz auch für Leitungen in manchen Abarten weitgehend durchgebildet; immerhin rechnet man dabei meistens mit Kurzschlusszeiten von ½ bis höchstens 1 Sekunde Dauer. Auf dem europäischen Kontinent neigte man im allgemeinen bisher nicht zu so scharfen Forderungen. Bekanntlich werden heute noch Netze von Bedeutung mit Maximalstromzeitschutz ausgerüstet und dabei Kurzschlusszeiten bis 5 Sekunden in Kauf genommen. Auf alle Fälle hat die Erfahrung verschiedener Hochspannungsnetze gezeigt, dass moderne Selektivschutzapparaturen imstande sind, volle Betriebssicherheit zu gewährleisten, trotzdem sie mit Kurzschlusszeiten bis 2 und sogar 3 Sekunden arbeiten. Trotzdem ist nicht zu verkennen, dass die Forderung nach Kürzung der Kurzschlusszeiten auch bei uns immer mehr Beachtung gewinnt.

Kurzschluss-Schutzeinrichtungen sollen Schalterauslösungen nur bei Kurzschlüssen hervorrufen; sie sollen besonders auf Netzpendelungen und Ueberlastungen nicht reagieren. Schutzeinrichtungen, welche durch Netzpendelungen in Gang gesetzt werden, können wahllose Abschaltungen und damit unter Umständen ein völliges Auseinanderbrechen eines Netzes verursachen. Eine Ueberlast bedeutet keine unmittelbare Gefährdung eines Betriebes, solange sie in mässigen Grenzen bleibt; sie kann allerdings je nach ihrem Verhältnis zur normalen Belastbarkeit eines Netzteiles in längerer oder kürzerer Zeit dazu führen, dass dessen Erwärmung zulässige Grenzen überschreitet. Da jedoch diese Zeit gewöhnlich genügt, um die Ueberlast durch zweckmässige Schaltmassnahmen zu beseitigen, bevor, besonders bei Freileitungen, irgendwelche Gefahr im Verzuge ist, muss zum mindesten für wichtige Betriebe der Einbau von Einrichtungen, welche auch bei mässiger Ueberlast Abschaltungen in wenigen Sekunden verursachen, als verkehrte Massnahme bezeichnet werden. Gegen Ueberlastungen sollten grundsätzlich «thermische» Schutzeinrichtungen verwendet werden.

Die Forderungen nach Unabhängigkeit der Relaiseinstellungen von den Betriebsverhältnissen und nach Einheitlichkeit der Ausrüstungen aller Schaltstellen eines Netzes verstehen sich eigentlich von selbst. Schaltungsänderungen müssen in einem Betrieb ohne Rücksicht auf die Relaiseinstellungen möglich sein; sind sie doch oft in Notfällen vorzunehmen, in denen rasche Handlungsfähigkeit von grösster Bedeutung ist. Einheitlichkeit der Ausrüstungen vereinfacht die Kontrolle und trägt mittelbar zur Betriebssicherheit bei.

Vorteilhaft ist eine derartige Ausführung der Schutzapparate, dass aus ihrer Arbeitsweise auf die Entfernung zwischen Störungsstelle und ausgelöstem Schalter geschlossen werden kann. Dadurch kann bei der Behebung lokaler Kurzschlusszerstörungen wertvolle Zeit eingespart werden.

Selbstverständlich fällt bei der Wahl von Schutzeinrichtungen der Preis erheblich ins Gewicht. Dabei sind für die Beurteilung der Kostenfrage nicht nur die eigentlichen Schutzapparaturen von Bedeutung, sondern auch die nötigen Zusatzeinrichtungen, wie Spannungs- und Stromwandler, Hilfsleitungen usw. Im allgemeinen wird ein Schutzsystem um so kostspieliger sein, je vollständiger es die aufgestellten Bedingungen erfüllt. Je nach der wirtschaftlichen Bedeutung eines Betriebes wird man sich daher mit einer mehr oder weniger guten Annäherung an das Optimum begnügen.

B. Die Schutzarten.

In der historischen Entwicklung der Schutzsysteme spiegelt sich die steigende wirtschaftliche Bedeutung der elektrischen Energieversorgung. Ursprünglich hatte der Kurzschlußschutz einfach die Aufgabe, Stromerzeuger und Leitungen vor übermässiger Beanspruchung zu schützen; er war identisch mit dem Ueberlastschutz. Schmelzsicherungen beherrschten das Feld. Diese erlaubten bei planmässiger Verwendung gestufter Schmelzdrahtquerschnitte sogar die Durchführung eines Selektivschutzes mit Zeitstaffelung. Da sich mit steigender Ausdehnung der Netze der Ersatz der Sicherungen und die damit verbundene Dauer der Stromunterbrüche als zu lästig erwiesen, ging man dazu über, die Schalter mit Organen auszurüsten, welche sie bei Kurzschlüssen automatisch eingreifen liessen. Momentanwirkende, nach Ansprechstromstärken abgestufte Maximalstromrelais konnten nicht befriedigen; besteht doch kaum ein Netz, für das eine unveränderliche, nur durch die räumliche Lage der Störungsstellen bedingte Kurzschlußstromstufung bestimmt werden könnte. Die Einführung von Maximalstromrelais mit einstellbar verzögerter Auslösung dagegen war erfolgreich. Selektierschwierigkeiten, welche sich mit dem Ausbau der Netze einstellten, konnten durch Kombination des Maximalstromzeitschutzes mit einem Energierichtungsschutz bewältigt werden; besonders das Prinzip der sogenannten gegenläufigen Staffelung erwies sich als fruchtbar. Immerhin erkannte man, dass eine klare Selektion mit Hilfe der Staffelung fest eingestellter Relaislaufzeiten überhaupt nur innerhalb bestimmter einfacher Netzgebilde, wie Strahlennetz, einseitig gespeistem Leitungsring usw. durchführbar ist. In kompliziert vermaschten Netzen musste man daher durch planmässige Verteilung von Momentschaltern dafür sorgen, dass ein Netz bei Störung sofort in eine Anzahl solcher Grundgebilde aufgetrennt wurde. Die Kompliziertheit dieser Systeme, ihre Unwirksamkeit bei Kurzschlüssen im Schwachlastbetrieb der Netze und die lange Störungsdauer, welche der Maximalstromzeitschutz besonders bei Kurzschlüssen in der Nähe von Kraftwerken ergab, mussten jedoch mit der Zeit das Interesse für neue Schutzmethoden wecken. In England mit seiner fast ausschliesslich gemeindeweisen Energieversorgung und daher mit dichten Netzen von kurzer Leitungslänge, setzte sich frühzeitig der Differentialschutz in verschiedenen Varianten durch; bei uns blieb dieser praktisch auf das Gebiet des Maschinenschutzes beschränkt. Dagegen setzte eine intensive Entwicklung ein, welche über Spannungsabfallzeitschutz, Maximalstromzeitschutz mit spannungsabhängiger Zeiteinstellung zu den modernen Impedanz- und Reaktanzschutzmethoden führte. Diese gehen alle von der Vorstellung des sogenannten Spannungstrichters aus, d. h. von der Erkenntnis, dass bei einem Kurzschluss die Kurzschlußspannung und damit die Impedanz der Leitungsschleife zwischen einer zunächst beweglich gedachten Meßstelle und der Kurzschlussverbindung an der Störungsstelle praktisch Null ist und dass beide nach allen Seiten entgegen der Flussrichtung der Kurzschlussenergie anwachsen. Die Verwendung von Relais, deren Laufzeit mit der Spannung oder ihrem Verhältnis zum Strom zeigt und fällt, ergibt daher einen Kurzschlußschutz mit einer Zeitselektion, die jeweils von der Störungsstelle ausgeht und zu verhältnismässig kurzen Störungszeiten führt. Der Spannungsabfallzeitschutz hat sich nicht durchsetzen können, da seine Arbeitsweise zu stark durch die Betriebsverhältnisse beeinflussbar ist; Impedanz- und Reaktanzschutz finden dagegen in verschiedenen Varianten zunehmende Verwendung. Aus Versuchen, die Verzerrung der Spannungs- und Strombilder im Kurzschluss für den Kurzschlussschutz direkt nutzbar zu machen, ist vornehmlich ein Asymmetriezeitrelais hervorgegangen, dessen Laufzeit vom Verhältnis Mit- zu Gegenleistung an seiner Einbaustelle abhängt und daher mit der Entfernung zwischen Einbauort und Störungsstelle anwächst; da es jedoch bei dreipoligen Kurzschlüssen nicht arbeitsfähig ist, hat es keine weite Verbreitung gefunden. In der neuesten Entwicklung, welche auf schärfste Verkürzung der Kurzschlussdauer ausgeht, spielt sich die Auseinandersetzung zwischen Differentialschutz, Impedanz- resp. Reaktanzstreckenschutz und Energierichtungsstreckenschutz mit Hilfsstromverriegelung ab; auf diese Systeme werden wir im folgenden näher eingehen. Die Versuche, auch in die Schutzsysteme Elemente der technischen Elektronik einzuführen, berühren die Frage nach den Prinzipien der Schutzmethoden nicht, so bedeutsam sie eventuell für die zukünftige praktische Durchbildung derselben werden können.

Nach diesem allgemeinen Ueberblick seien die wichtigsten Schutzmethoden kurz einzeln durchgangen mit der Absicht, den Bereich ihrer Verwendbarkeit einzugrenzen. Dabei ist es zweckmässig, sich zunächst folgendes klar zu machen: Schutzeinrichtungen umfassen stets in mehr oder weniger enger konstruktiver Verbindung Ansprech- und Selektierorgane. Demnach hat man bei der Diskussion der Schutzmethoden Ansprech- und Selektiergrössen oder -mittel zu unterscheiden. Die Ansprechorgane dienen zur Erfassung eines Kurzschlusszustandes im Netz, während den Selektierorganen die Aufgabe zufällt, die Selektivität der

Kurzschlussabschaltung sicherzustellen. Deutlich ist diese Scheidung zwischen den verschiedenen Funktionen bei jener Art von Maximalstromzeitrelais-Ausrüstungen, welche aus einer Kombination momentan wirkender Ueberstromrelais pro Phase als den Ansprechorganen und einem Zeitrelais als Selektierorgan bestehen; dieses wird beim Ansprechen eines Maximalstromrelais in Gang gesetzt und bewirkt die Schalterauslösung nach Ablauf der eingestellten Laufzeit. Kombiniert man solche Relais mit Energierichtungsrelais, so sind letztere als Teil der Selektierorgane zu betrachten. Weniger durchsichtig ist die Anwendung jener Grundbegriffe auf Differentialschutzsysteme; Ansprechgrösse ist hier eindeutig der Differentialstrom, als Selektiermittel und -organ muss jedoch die Differentialschaltung als solche angesprochen werden.

Auf Sicherungen und momentan wirkende Maximalstromauslöser soll hier nicht näher eingetreten werden. Sie haben noch Bedeutung als rasch wirkende Auslöseorgane in Netzausläufern verhältnismässig kleiner Leistung.

Maximalstromzeitrelais sind so bekannt, dass lange Ausführungen über sie nicht am Platze wären. Wegen ihrer praktischen Bedeutung scheinen jedoch ein paar grundsätzliche Feststellungen nicht ganz überflüssig. Sie werden bekanntlich entweder als Primärrelais direkt in den Zug der zu schützenden Leitungen geschaltet oder als Sekundärrelais durch Stromwandler gespeist. Primärrelais lässt man gewöhnlich die zugehörigen Schalter über ein Isoliergestänge direkt mechanisch auslösen, während man Sekundärrelais mit Kontakten in den Schalterauslösekreisen versieht. Für die Konstruktionsbedingungen folgt daraus, dass Primärrelais imstande sein müssen, beim Auslösen eine erhebliche mechanische Arbeit zu leisten, während für Sekundärrelais kleiner Energieverbrauch, d. h. kleine Belastung ihrer Stromwandler, wichtig ist. Je ausgedehnter die Netze sind, um so höhere Anforderungen muss man an die Laufzeitgenauigkeit der Maximalstromzeitrelais stellen; Laufzeitstaffelungen von 0,5 Sekunden sollten unbedenklich erreicht werden können.

Von untergeordneter Bedeutung für den Kurzschlußschutz ist die Ansprechstromgenauigkeit dieser Relais; man muss nur Gewähr haben, dass sie beim minimalen Kurzschlußstrom, der an ihrer Einbaustelle besonders bei einem Kurzschluss im zugeordneten Leitungsabschnitt auftreten kann, in Funktion treten. Wenn trotzdem häufig Gewicht auf grosse Ansprechgenauigkeit gelegt wird, so kommt dies von der gebräuchlichen Zweckvermischung zwischen Ueberlast- und Kurzschlußschutz her. Für den Ueberlastschutz ist die Laufzeitgenauigkeit nebensächlich; dagegen ist es für ihn nicht ganz gleichgültig, ob ein Relais bei 10% mehr oder weniger Ueberlast in Gang kommt. Der Kontinuität eines Betriebes dürfte es jedoch wenig zuträglich sein, dass ein solcher kombinierter Kurzschluss- und Ueberlastschutz eventuell wichtige Netzelemente bei verhältnismässig kleiner Ueberlastung nach wenigen Sekunden abschaltet. Man wird sich daher von Fall zu Fall darüber klar werden müssen, wie weit eine Berücksichtigung der Forderungen des Ueberlastschutzes beim Einbau von Maximalstromzeitrelais am Platze ist.

Besonderes Gewicht wird heute vielfach auf die Kurzschlussfestigkeit der Primärrelais gelegt. Sicher dürfen diese Relais thermisch und dynamisch nicht schwächer sein als die Schalter, zu denen sie gehören. Dagegen ist es vom Standpunkt des Kurzschlußschutzes aus falsch, wenn man zugunsten der Kurzschlussfestigkeit Konzessionen hinsichtlich der Laufzeitgenauigkeit macht. Auch der beliebte Hinweis auf Abzweige kleiner Leistung von starken Netzen, wie Eigenverbrauchstransformatoren in Kraftwerken oder Hochspannungsmotoren an städtischen Verteilnetzen, ist nicht stichhaltig. In solchen Fällen gehört der Ueberlastschutz auf die Unterspannungs- resp. Sternpunktseite des Schützlings. Davor jedoch wird ein Kurzschlussschutz eingebaut, dessen Ansprechstrom etwas unter dem minimalen Kurzschlußstrom liegt; als solcher ist bei Transformatoren der Primärstrom zu betrachten, der bei sekundärem Klemmenkurzschluss auftritt. Damit werden Relais verwendbar, deren minimaler Ansprechstrom ein erhebliches Vielfaches des Betriebsstromes in ihrem Abzweig ist, und daher für die meisten Fälle Relais mit der schon seit Jahren üblichen Kurzschlussfestigkeit.

Nach der sogenannten Relaischarakteristik, d. h. der Abhängigkeit zwischen Laufzeit und Strom, ist es üblich, unabhängige, begrenzt abhängige und abhängige Maximalstromzeitrelais zu unterscheiden. Der Unterschied zwischen abhängigen und begrenzt abhängigen Relais liegt darin, dass sich bei den erstgenannten die Laufzeit mit steigendem Strom dem Werte Null, bei den anderen jedoch einem meist einstellbaren, von einer bestimmten Stromstärke an festen Betrage nähert. Wird ein Netz mit mehrfacher Einspeisung und reicher Vermaschung durchwegs mit identischen Relais oder mit Stromwandlern von gleichem Uebersetzungsverhältnis zur Speisung der Relais ausgerüstet, so bieten besonders die begrenzt abhängigen Relais gegenüber den unabhängigen gewisse Vorteile für die Selektion. Der Kurzschlußstrom pro Leitung muss im gestörten Leitungsabschnitt ein Maximum sein und von dort aus sich an jeder Verbindungsstelle weiter verzweigen; daher verstärkt die Stromabhängigkeit der Laufzeit die eingestellte Laufzeitstaffelung gegen die Kraftwerke hin. Da in Wirklichkeit die genannte Voraussetzung eigentlich nie erfüllt ist, riskiert man bei der Verwendung abhängiger Relais unübersichtliche Zustände. Für systematisch durchgebildete Kurzschluss-Schutzsysteme empfiehlt sich im Interesse möglichster Klarheit der Verhältnisse die Verwendung unabhängiger Maximalstromzeitrelais.

Der Verwendbarkeit des Maximalstromzeitschutzes sind, wie kurz erwähnt [1]), folgende Grenzen gesetzt:

[1]) S. a. H. Puppikofer, Bull. SEV 1929, S. 252.

In Netzen, in denen bei Schwachlastbetrieb in kranken Leitungsabschnitten Kurzschlußströme auftreten können, welche kleiner sind als die Vollastbetriebsströme, eignet sich der Ueberstrom nicht als Ansprechgrösse. Die feste Laufzeitstaffelung selbst in Verbindung mit einer Energierichtungsverriegelung führt nur in bestimmten einfachen Netzgebilden zu einer eindeutigen Selektion. In komplizierten Netzen ist sie nur als Selektiermittel verwendbar, wenn diese bei Störung durch planmässig verteilte Momentanschalter in ein mehr oder weniger fest verbundenes System selektionsfähiger Einzelstromkreise, beispielsweise einseitig gespeister Ringleitungen, aufgelöst werden. Schliesslich müssen besonders in wenig stabilen Netzen die Störungszeiten, zu denen die feste Laufzeitstaffelung führt, als unzulässig hoch betrachtet werden.

Im übrigen zeichnet sich der Maximalstromzeitschutz durch grosse Einfachheit der Apparaturen aus; die Relaiskonstruktionen sind im allgemeinen gesund; die Relaisspeisung ist denkbar einfach. Die Genauigkeit der Stromwandler, welche sekundäre Maximalstromzeitrelais zu speisen haben, braucht nicht gross zu sein, vor allem nicht bei Stromwerten, welche von der Grössenordnung der Relaisansprechströme merklich nach oben oder unten abweichen. Solange bei den verschiedenen Kurzschlussformen unter allen Betriebsverhältnissen und wenigstens in den Störungsabschnitten genügend grosse Ströme auftreten, ist der Maximalstromzeitschutz unabhängig von Störungsform und Betriebsverhältnissen arbeitsfähig; eine Schutzreserve ist stets vorhanden. Eine periodische Prüfung der Relais ist ohne weiteres durchführbar, bei Primärrelais allerdings nur im spannungsfreien Zustand der zugehörigen Leitung. Wechsel der Störungsform während der Kurzschlussdauer, Impedanz- und Leistungssprünge werden dem Maximalstromzeitschutz nicht gefährlich.

Treten in einem Netz Pendelungen auf oder fallen einzelne Kraftwerke gegeneinander ausser Tritt, so bringen die Ausgleichströme den Maximalstromzeitschutz zum Ansprechen. Der Eintritt einer Abschaltung hängt bei den Relaisarten, welche momentan in ihre Ausgangsstellung zurückgehen, sobald ihr Rückfallstrom unterschritten wird, vom Verhältnis der Relaislaufzeit zur Periodendauer der Pendelung resp. der Schlupfdauer bei Ausser-Tritt-Fallen ab; grösste Abschaltwahrscheinlichkeit weisen daher Relais mit kurzer Laufzeiteinstellung auf. Bestimmte Relaisarten, besonders Ferrarisrelais, haben die Eigenschaft zu «integrieren» und bei genügender Höhe der Ausgleichströme stets im Verlauf einiger Pendelungen zu Abschaltungen zu führen. Dieser Vorgang stellt sich dann ein, wenn die Relais während jenem Teil einer Halbperiode der Ausgleichstromschwebung, in dem der Relaisansprechstrom überschritten wird, sich weiter in der Schliessrichtung bewegen, als sie während dem Rest der Schwebungsdauer zurücklaufen.

In den Netzen, die sich für Maximalstromzeitschutz eignen, kann die Relaiseinstellung unabhängig von den Betriebsverhältnissen vorgenommen werden; ebenso bestehen keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, beim Ausbau eines Netzes gleiche Schutzelemente wie in den bestehenden Teilen zu verwenden.

Für eine Distanzanzeige eignen sich Maximalstromzeitrelais nicht.

Der Spannungsabfallzeitschutz bietet, wie schon bemerkt, nur mehr historisches Interesse als erster Schritt zum Impedanz-Zeitschutz. Zu diesem sind jene Systeme zu zählen, in denen sich die Auslösezeit jeweils möglichst proportional zur Impedanz oder Reaktanz der Kurzschlußstrombahn zwischen Einbauort der Relais und Kurzschlußstelle einstellt. Zwei der ersten [2]) Relais dieser Art bilden eine konstruktive Verbindung selbständiger Ueberstromzeit- und Spannungsabfallorgane; man charakterisiert sie am besten als Stromzeitrelais mit spannungsabhängiger Zeiteinstellung. Sie sprechen teilweise noch auf Ueberstrom an; teilweise können sie mit Spannungsabfall- oder Minimalimpedanz-Ansprechorganen versehen werden. Bei der letztgenannten Ansprechmethode werden die Relais in Gang gesetzt, sobald an ihrer Einbaustelle das Verhältnis Spannung zu Strom ein minimales, betriebsmässigen Verhältnissen nicht mehr entsprechendes Mass unterschreitet; sie sind daher fähig, auch bei Kurzschlußströmen unter dem Vollaststrombetrag in Funktion zu treten. An sich sind die genannten Relais für die Stromrichtung unempfindlich; um sie voll selektierfähig zu machen, müssen sie mit selbständigen Energierichtungs-Sperrorganen versehen werden.

In einer weiteren Bauart [3]) wird die Geschwindigkeit, mit der das Selektierglied einen festgelegten Auslöseweg zurücklegt und umgekehrt die Auslösezeit vom Verhältnis einer wählbaren Komponente der Scheinleistung, beispielsweise der Blindleistung, zum Quadrat der Störungsspannung abhängig gemacht. Andere Ausführungsformen [4]) enthalten ein eigentliches Ohmmeter, das direkt eine bestimmte Komponente der Kurzschlussimpedanz, beispielsweise die Reaktanz, misst und durch Einnahme einer bestimmten Stellung den Weg des Auslösegliedes und damit die Zeit festlegt, in der dieses bei konstanter Verstellgeschwindigkeit die Schalterauslösung einleitet. Die Arbeitsweise der Relais dieser zweiten Art ist abhängig von der Phasenverschiebung zwischen den Strömen in Spannungs- und Stromsystem; sie sind daher ohne zusätzliche Richtungselemente selektierfähig. Besonders beim Schutz von Netzen hoher Spannung verwendet man mit Vorliebe die Selektion nach der Reaktanz; die Distanzmessung wird dadurch praktisch unabhängig vom Ohmschen Widerstand des Kurzschlusslichtbogens. Auch diese Relais werden mit selb-

[2]) S. Beschreibung der Westinghouse- und Dr. P. Meyer-Distanzrelais im Vortrag von J. Stöcklin, Bull. SEV 1928, S. 517 A.

[3]) S. Beschreibung des ersten AEG-Relais in der genannten Arbeit von J. Stöcklin.

[4]) S. Beschreibung des BBC-Distanzrelais in der genannten Arbeit von J. Stöcklin.

ständigen Ansprechorganen, meist nach dem Minimalimpedanzprinzip ausgerüstet.

Wie die Praxis gezeigt hat, ist es möglich, selbst komplizierte Netze mit Impedanz- oder Reaktanz-Zeitrelais unter allen Betriebsverhältnissen sicher selektiv zu schützen. Auch die Gefährdung der Selektion durch Wechsel der Störungsform während der Auslösezeit, sowie durch Impedanz- und Leistungssprung beim Ausschalten des ersten Schalters haben sich durch Massnahmen konstruktiver Art oder besondere Anordnungen in den Relaisschaltungen sicher überwinden lassen. Die maximalen Auslösezeiten liegen in der Grössenordnung von 1 bis 2 Sekunden. Versagt einmal die Schalterauslösung an einem Ende eines defekten Leitungsabschnittes, so sind die Relais dahinterliegender Abschnitte bereit, ebenfalls selektiv einzugreifen. Mit Hilfe dieser Distanzrelais ist es möglich, alle Kurzschluss-Störungsformen zu erfassen; immerhin werden die Schaltungen um so komplizierter, je vollständiger sie besonderen Eigenheiten der verschiedenen Störungsformen angepasst werden. Wie aus den Untersuchungen im ersten Hauptteil dieser Arbeit hervorgeht, müssen je nach der Störungsform die Phasenströme oder verketteten Ströme mit den verketteten Spannungen oder den Spannungen der Phasenleiter gegen Erde kombiniert werden, damit der Schutz jeweils nach der Impedanz des Störungsstromkreises selektieren kann. Dies führt dazu, dass für einen vollständigen Schutz eines Dreiphasennetzes pro Schaltstelle entweder 6 Distanzrelais eingebaut werden müssen oder eine ganze Reihe von Hilfsrelais, welche eine reduzierte Zahl von Distanzrelais fallweise so mit den Spannungswandlern verbinden, dass eine richtige Selektion verbürgt wird. Alle diese Schaltungen können so ausgeführt werden, dass eine vollständige Prüfung einzelner Relaissätze während des Betriebes möglich ist.

An die Genauigkeit der Spannungs- und Stromwandler, welche Distanzrelais zu speisen haben, müssen gewisse minimale Anforderungen gestellt werden; üblich ist, für die maximal zugelassenen Uebersetzungs- und Winkelfehler $\pm 5\,\%$ und $\pm 5°$ vorzuschreiben. Die Stromwandler insbesondere müssen diese Bedingung im ganzen Strombereich vom minimalen bis zum maximalen Kurzschlussstrom an ihrer Einbaustelle erfüllen. Es ist zu beachten, dass dieses Verhalten durch keine der bestehenden Klassenbezeichnungen für Stromwandler in irgendeiner Landesvorschrift erfasst wird.

Impedanz -und Reaktanzzeitrelais sind unempfindlich für Ueberlastungen ihrer Schützlinge; dagegen reagieren sie beim Aussertrittfallen der Kraftwerke. Stehen die schlüpfenden Generatoren in Opposition, so haben die Spannungs- und Stromverhältnisse grosse Aehnlichkeit mit denjenigen bei dreipoligem metallischem Kurzschluss. An einer oder eventuell mehreren Netzstellen verschwindet die Spannung vollständig. Distanzrelais in ihrer Nähe sprechen an, als ob dort ein Kurzschluss herrschte. Je nach dem Verhältnis der Relaisauslösezeit, welche der Impedanzmessung im Moment der Phasenopposition entspricht, zur Dauer einer Schlupfperiode, kommt es zu Fehlauslösungen oder nicht.

Da die Distanzrelais nach den Daten des Leitungsabschnittes eingestellt werden, zu dem sie gehören, ist ihre Einstellung eine einmalige Angelegenheit. Distanzschutzsysteme sind mit dem Ausbau der Netze beliebig und nach einheitlichen Gesichtspunkten erweiterungsfähig. Immerhin sei nicht verhehlt, dass in einzelnen Fällen die Aufstellung des sogenannten Staffelplanes Schwierigkeiten verursacht, besonders da, wo Leitungsstücke mit erheblichen Längenunterschieden oder Netze mit verschiedenen Schutzsystemen zusammenstossen; sie sind jedoch nie unüberwindlich.

Der Impedanzzeitschutz eignet sich seinem Prinzip nach zur Distanzanzeige; bei Verwendung von Ausrüstungen mit geringer Streuung, besonders mit geringer Stromabhängigkeit, lässt sich die Lage der Störungsstelle mit ziemlicher Genauigkeit aus den Laufzeiten bestimmen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei gleichem Abstand zwischen Relais und Störungsstelle die Grösse der Störungsimpedanz mit der Störungsform erheblich ändern kann.

Eine Sonderform des Impedanzschutzes ist der sogenannte Streckenimpedanzschutz [5]), auch Minimalimpedanz- oder Stufenimpedanzschutz genannt. Die Ueberlegung, welche ihr zugrunde liegt, ist folgende: Relais werden stets an einem Ende eines Leitungsabschnittes eingebaut. Erfolgt auf ihm ein Kurzschluss, so misst man an der Einbaustelle der Relais eine Kurzschlussimpedanz, deren Wert dann ein Maximum ist, wenn die Kurzschlußstelle gerade am entgegengesetzten Leitungsende liegt. Dieses Impedanzmaximum ist somit ein Mass für die Länge der vom betreffenden Relais zu schützenden Strecke. Hätte man streuungsfreie Impedanzrelais zur Verfügung, so könnte man sie so einstellen, dass sie mit kurzer Auslösezeit arbeiteten, sobald sie bei Kurzschluss eine Impedanz unter diesem Grenzwert messen; man erhielte so einen Selektivschutz von erheblicher Raschheit in all den Fällen, in denen keine Versager der Auslösung eintreten. Um dafür eine Schutzreserve zu schaffen, müsste man durch zusätzliche Impedanzrelais oder Zusatzorgane zu den Hauptimpedanzrelais für eine Auslösung jedoch mit Verzögerung auch bei Ueberschreitung des zugehörigen Streckenimpedanzwertes sorgen. Entgegen der Grundidee lässt es die unvermeidliche Streuung der Relais und die Abhängigkeit der Streckenimpedanzwerte von der Störungsform nicht ratsam erscheinen, die Strecke, welche minimaler Auslösezeit entspricht, dem jenseitigen Streckenende auf mehr als 20 bis 30 % der Streckenlänge zu nähern; man riskiert sonst Fehlauslösungen bei Kurzschlüssen am nahen Ende «jenseitiger» Leitungsabschnitte. Kurzschlüsse auf diesen Endabschnitten werden durch die Organe der Schutzreserve verzögert abgeschaltet. Daraus folgt, dass bei zweiseitiger Speisung

[5]) S. beispielsweise H. Puppikofer, loc. cit.

eines Leitungsabschnittes Kurzschlüsse nur auf etwa der Hälfte seiner Länge mit der Minimalzeit völlig abgetrennt werden.

Für den Streckenimpedanzschutz werden als Selektierorgane sowohl Relais mit magnetisch getrennten Strom- und Spannungssystemen, d. h. reine Impedanzrelais, als auch solche mit magnetisch gekuppelten Systemen, besonders Reaktanzrelais, verwendet. Zur vollständigen Ausrüstung gehören zudem Energierichtungsrelais, Maximalstrom- oder Minimalimpedanz - Ansprechorgane, Verzögerungsorgane für die Schutzreserve und eventuell verschiedene Hilfsapparate wie in Schaltungen der Impedanzzeitrelais, die je nach der Störungsform für die zweckmässigste Schaltung der Spannungskreise sorgen. Die minimale Auslösezeit dieser Systeme liegt in der Grössenordnung von 0,5 Sekunden. Die verschiedenen Systeme unterscheiden sich durch Konstruktion und Schaltung der Relais und den Charakter der Beziehung zwischen Verzögerung und Mass der Ueberschreitung der Streckenimpedanz.

Streckenimpedanz - Schutzsysteme erfüllen bei entsprechender Qualität der Konstruktionen und Schaltungen die aufgestellten Sicherheits- und Selektivitätsforderungen ebensogut wie Impedanzzeitschutzsysteme. Ebenso gelten unsere Bemerkungen über die Abhängigkeit der Schaltungen vom Schutzumfang, die Anforderungen an die speisenden Wandler, die Unabhängigkeit der Relaiseinstellung von den Betriebsverhältnissen und die Ausbaufähigkeit des Schutzes gleichermassen für beide Systeme. Auch bietet die Aufstellung der Einstellpläne beim Streckenschutz grundsätzlich die gleichen Schwierigkeiten wie beim Zeitschutz. Die durchschnittliche Raschheit des Streckenschutzes ist etwas höher als diejenige des Zeitschutzes; jedoch genügen die minimal erreichbaren Zeiten nicht, um in labilen Netzen ein Ausser-Tritt-Fallen sicher zu vermeiden; Fehlausschaltungen besitzen dann aber gerade wegen der Kürze der Auslösezeiten grosse Wahrscheinlichkeit. Eine Distanzanzeige ist beim Streckenimpedanzschutz prinzipiell nicht ausgeschlossen; sie bietet jedoch so grosse praktische Schwierigkeiten, dass sie bisher nie ausgeführt wurde.

Das Arbeitsprinzip des Differentialschutzes darf als bekannt vorausgesetzt werden [6]). Bei seiner Anwendung auf Leitungssysteme unterscheidet man in der Hauptsache Längs- und Querdifferentialschutz. Die erste Art eignet sich zum Schutz von Einzelleitungen. In ihr werden die Ströme an beiden Leitungsenden verglichen. Bei Verwendung des sogenannten Stromdifferentialschutzes schaltet man die beiden Stromwandler in Reihe; ein eventueller Differenzstrom wird über die Reihenschaltung der Differentialrelais an beiden Leitungsenden geführt. Beim sogenannten Spannungsdifferentialschutz, welcher im allgemeinen beim Leitungsschutz bevorzugt wird, schaltet man entweder Spezialstromwandler mit schwacher Sättigung in Opposition oder vergleicht die Spannungen, welche der Sekundärstrom normaler Stromwandler in Vergleichwiderständen erzeugt. Entsteht eine Spannungsdifferenz, so erzeugt diese in einer Ausgleichsleitung über die Differentialrelais beider Schaltstellen einen Ausgleichstrom; dies führt zur Schalterauslösung.

Der Querdifferentialschutz ist nur beim Parallelbetrieb von Leitungen verwendbar. Er vergleicht phasenweise die Stromverteilung auf die Parallelleitungen. Bei gesundem Betrieb muss diese dem umgekehrten Verhältnis der Leitungsimpedanzen entsprechen. Wird dieses nicht eingehalten, so erfolgt selektive Abschaltung der defekten Leitung. Eine Art Querdifferentialschutz für Einzelleitungen bildet der sogenannte split-conductor-Schutz. Bei ihm besteht jeder Phasenleiter aus zwei gegeneinander schwach isolierten Leitern. Die Stromverteilung auf beide wird mit Hilfe eines geeigneten Spezialstromwandlers überwacht. Da mit einiger Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann, dass ein Kurzschluss zunächst nur einen Leiter erfasst, kann bei genügender Raschheit der Relais mit einer selektiven Abschaltung gerechnet werden.

Ein Differentialschutz zeichnet sich durch Einfachheit seines Arbeitsprinzipes, rasche Arbeitsweise, absolute Selektivität und hohe Empfindlichkeit bei bemerkenswerter Einfachheit der Relais und ausschliesslicher Speisung durch Stromwandler aus. Bei der Wahl der Wandler, die jeweils zusammenarbeiten, muss auf möglichst gute Uebereinstimmung der Uebersetzungscharakteristiken im ganzen Kurzschlußstrombereich geachtet werden, da sonst Fehlauslösungen bei durchgehenden Kurzschlüssen nur durch unempfindliche Einstellung der Relais vermieden werden können; diese Bedingung muss weniger scharf beachtet werden bei Verwendung von Differentialrelais, deren Auslösestromstärke mit der Grösse des durchgehenden Netzstromes steigt und fällt.

Der Differentialschutz ist bei jeder Störungsform gleich wirksam; er ist unempfindlich für Aenderungen der Betriebsverhältnisse, ebenso für Leitungsüberlastungen und Netzpendelungen. Soweit eine Einstellung überhaupt in Frage kommt, ist sie unabhängig von den Betriebsverhältnissen. Stets können einzelne Leitungsabschnitte selbst unabhängig von der Schutzart der übrigen Netzteile mit einem Differentialschutz ausgerüstet werden.

Nachteilig für den Längsdifferentialschutz sind die grosse Zahl und hohen Kosten der Hilfsleitungen, gewisse Schwierigkeiten, welche teils mit dem Spannungsabfall in ihnen und ihrer gegenseitigen Kapazität, teils mit den kapazitiven und induktiven Rückwirkungen von den zugehörigen Hochspannungsleitungen her zusammenhängen, sowie ihre Verletzbarkeit durch atmosphärische Erscheinungen, sobald sie nicht unterirdisch verlegt werden. Wenn sich Differentialschutzsysteme nicht im ganzen Netz überlappen, so bleiben diejenigen Teile, welche von ihnen nicht überdeckt werden, z. B. Sammelschienen, vollständig ungeschützt, sofern

[6]) S. auch H. Puppikofer, loc. cit.

man das Schutzsystem nicht durch Einfügung von Maximalstromzeitrelais oder ähnlichen Organen vervollständigt. Der Differentialschutz kann prinzipiell auf Sammelschienen ausgedehnt werden; nur wird er dort kompliziert, weil die Möglichkeit verschiedener Schaltkombinationen zwischen Leitungen und Sammelschienen offen bleiben muss und weil bei einer Sammelschienenstörung eine grössere Zahl je nach Betriebsschaltung kombinierter Schalter ausgelöst werden muss. Eine Schutzreserve kann in Netzen mit Längsdifferentialschutz nur durch Ueberlagerung eines zweiten Schutzsystemes geschaffen werden. Vorbeugende Massnahmen sind unter Umständen vorzusehen, um Fehlauslösungen bei Leereinschaltungen von Leitungen oder Transformatoren zu vermeiden.

Der Querdifferentialschutz weist den gleichen Mangel einer Schutzreserve auf. Bei Leitungen, welche damit ausgerüstet werden, sind besondere Massnahmen für den Schutz im Einzelbetrieb vorzusehen; meistens verwendet man dazu Elemente des überlagerten Reserveschutzsystems. Zur Distanzanzeige eignet sich ein Differentialschutz nicht.

Eine gewisse Verwandtschaft mit dem Differentialschutz besitzen die Leitungsschutzmethoden mit Relaisverriegelung über einen Hilfsstromkreis. Auch sie bilden stets einen ausgesprochenen Streckenschutz; doch benötigen sie nur eine einzige Verbindung pro Leitung oder eventuell sogar pro Doppelleitung. Eine einfache Einrichtung dieser Art besteht aus dreiphasigen Leistungsrelais oder Nullleistungsrelais an jedem Ende einer Leitungsstrecke; diese schliessen einen Kontakt, sobald Leistung an ihrer Anschlußstelle in die Leitung hineinfliesst; normalerweise ist somit stets nur einer der beiden Kontakte geschlossen; bei Störung dagegen schliessen beide Relais ihren Kontakt. Verbindet man die Auslöseorgane der beiderseitigen Schalter durch eine Hilfsleitung, führt man den Stromkreis an beiden Enden über die Relaiskontakte und speist ihn mit einer Batterie, so wird er bei Störung der Leitung geschlossen und die Abschaltung eingeleitet. Ein ähnliches Schutzsystem ist so aufgebaut, dass die lokale Schalterauslösung durch Maximalstromrelais oder eine Kombination von Maximalstrom- und Richtungsrelais an einer Schaltstelle über einen Hilfsdraht gesperrt wird, falls entsprechende, gleichsinnig wirkende Relais am Anfange der in der Energierichtung folgenden Teilstrecke ebenfalls ansprechen. Nur die Auslösung durch die Relais, welche am Anfang der defekten Strecke liegen, ist dann freigegeben.

Einrichtungen der beschriebenen Art sind in Gefahr, unwirksam zu werden, sobald die Hilfsleitung beschädigt wird. Es sind daher neuerdings Anordnungen entwickelt worden, welche mit Ruhestrom arbeiten. Eine Ausführung arbeitet etwa folgendermassen:

An jedem Ende einer Leitung, zu der eine Hilfsleitung parallel geführt ist, sind Leistungs- oder Nulleistungsrelais eingebaut. Diese besitzen einen Kontakt, durch den das jeweilige Ende des Hilfsdrahtes mit einer Batterie verbunden wird, sofern an der betreffenden Anschlußstelle die Leistung von der Leitung nach den Sammelschienen fliesst. Die Batterien an den beiden Drahtenden besitzen gleiche Spannung und sind einseitig gleichpolig, z. B. über Erde, verbunden. An die Hilfsleitung ist bei jeder Schaltstelle ein Spannungsrelais angeschlossen. Dieses besitzt einen Kontakt, welcher im Auslösekreis des zugehörigen Schalters liegt und geschlossen wird, wenn das Relais seine Erregung verliert und abfällt. Die Energierichtungsrelais besitzen einen zweiten Kontakt, der in Reihe mit dem Kontakt des zugehörigen Spannungsrelais den Auslösekreis schliesst, sobald Leistung von den Sammelschienen in die Leitung hineinfliesst. Bei Normalbetrieb wird die Hilfsleitung über das Richtungsrelais an jenem Leitungsende auf Spannung gehalten, an welchem die Energie aus der Leitung austritt; beide Spannungsrelais sind angezogen und ihre Kontakte geöffnet. Gleiches gilt für den Fall einer Störung ausserhalb des betrachteten Leitungsabschnittes. Erfolgt jedoch eine Störung auf ihm selber, so öffnen beide Energierichtungsrelais ihre Kontakte vor dem Hilfsdraht und schliessen ihre Kontakte in den Schalterauslösekreisen; die Spannungsrelais fallen ab und vervollständigen den Schluss der Auslösekreise; die Schalter unterbrechen. Weist die Hilfsverbindung einmal einen Unterbruch oder Kurzschluss auf, so wird die Leitung am Ende abgeschaltet, an dem die Energie in sie eintritt; der zweite Schalter würde ebenfalls ausgelöst, wenn in diesem Zustand eine Störung auf der Leitung erfolgte. Die Leitung kann somit nur im Betrieb sein, wenn der Schutz in Ordnung ist.

Diese Systeme teilen weitgehend die Vor- und Nachteile des Differentialschutzes. Sie sind diesem gegenüber darin im Vorteil, dass sie mit bedeutend weniger Hilfsdrähten auskommen und sich verhältnismässig leicht zur Hochfrequenzkupplung eignen. Dagegen sind sie in ihrer Apparatur wesentlich komplizierter und grundsätzlich in Gefahr, auf Netzpendelungen oder wenigstens das Ausser-Tritt-Fallen von Kraftwerken mit Fehlauslösungen zu reagieren. An und für sich enthalten sie ebenfalls keine Schutzreserve, doch ist es bei einigen von ihnen je nach deren Aufbau möglich, Hilfsorgane des Hauptschutzsystems dafür zu verwerten. Ein abschliessendes Allgemeinurteil über solche Streckenschutzsysteme ist im übrigen heute noch nicht am Platze, da ihre Entwicklung eigentlich erst recht im Gange ist.

Für Kabel sind besondere Schutzsysteme entwickelt worden mit der Absicht, Isolationszerstörungen schon zu erfassen, bevor ein eigentlicher Kurzschluss eingetreten ist. Sie sind jedoch nur bei Kabeln besonderer Ausführung anwendbar. Beispielsweise erhalten solche in einem Fall (Pfannkuch-Schutz) als äusserste Lage jedes Phasenleiters eine Schicht leicht isolierter Drähte. Diese werden durch eine fremde Stromquelle auf Spannung gegenüber dem Hauptleiter gehalten. Ein Relais überwacht die Leistung, welche von den Deckdräh-

ten zum Hauptleiter übertritt. Normalerweise ist es eine Ladeleistung; setzt eine Isolationszerstörung ein, so wird zuerst die Isolation der Deckdrähte angegriffen. Es tritt im Relais ein Wattstrom auf und verursacht Signalisierung und eventuell Schalterauslösung. Andere Kabel (Glaserschutz) erhalten einen Metallbelag, welcher konzentrisch zu jedem Phasenleiter in die Isolation eingewickelt wird. Im gesunden Kabel hat dieser eine bestimmte Spannung einerseits gegen den Leiter und anderseits gegen Erde. Beide Spannungen werden in einem geeigneten Relais verglichen. Setzt eine Zerstörung ein, so geht die Spannung zwischen Belag und Leiter gegenüber der anderen zurück. Dies führt zur Schalterauslösung durch das Relais.

Bei den Schnellselektivschutzsystemen, welche bisher beschrieben worden sind, handelt es sich durchwegs um Varianten der erwähnten Streckenschutzmethoden, besonders des Längsdifferential- und des Streckenimpedanzschutzes. Unter ihnen ist eine Art Längsdifferentialschutz sehr interessant, welche den Vergleich der Ströme an beiden Leitungsenden über eine leitungsgerichtete Hochfrequenzübertragung vermittelt, wobei nicht die Stromgrösse, sondern die Phasenlage massgebend ist. Die Schnellimpedanzschutzsysteme unterscheiden sich im Grunde von den beschriebenen Strekkenimpedanzschutzmethoden nur durch die Verkürzung der minimalen Auslösezeit auf wenige Halbperioden. Dabei ist es natürlich nicht mehr zulässig, durch vorbereitende Schaltmanöver den Spannungsanschluss der Relais der jeweiligen Störungsform anzupassen. Folglich muss mindestens für isolierte Kurzschlüsse und Kurzschlüsse gegen Erde ein gesonderter Schutz eingebaut werden. Auch beim Schnellimpedanzschutz beschränkt sich die Anwendbarkeit der eigentlichen Schnellabschaltung auf Kurzschlüsse in einem mittleren Bereich der Leitungsstrecke. Der Rest muss verzögert ausgelöst werden durch die Organe der Schutzreserve.

C. Die Wahl einer Schutzmethode.

Es mag zunächst als Zweck einer allgemeinen Untersuchung der vorliegenden Art erscheinen, aus der Zahl der Lösungsmöglichkeiten des betrachteten Problemes diejenige herauszuarbeiten, welche die gestellte Aufgabe am vollkommensten erfüllt, und sie als endgültige Lösung zu kennzeichnen. Die bisherigen Darlegungen dürften es jedoch deutlich machen, dass so etwas im vorliegenden Zusammenhang praktisch wertlos wäre. Oekonomische und technische Gründe lassen die allgemeine Verwendung einer schutztechnisch optimalen Methode gar nicht zu. Für den Betriebsmann handelt es sich vielmehr darum, die Wahl seiner Schutzmittel so zu treffen, dass sie dem wirtschaftlichen und technischen Charakter seines Betriebes angepasst sind. In wirtschaftlich wichtigen und technisch gut ausgebauten Betrieben kann man im Interesse der Kontinuität des Betriebes nicht genug Sorgfalt auf Planung und Unterhalt der Schutzeinrichtungen verwenden. Dagegen wäre es sinnlos, sehr vollständige und teure Apparaturen dort einzubauen, wo beispielsweise hohe Schnelligkeit der Abschaltung und absolute Selektivität kein unbedingtes Erfordernis bilden oder wo die Art der Betriebsführung eine richtige Wartung des Schutzes nicht gewährleistet. Ein solches Vorgehen wäre besonders dort zwecklos, wo die Qualitäten einer hochwertigen Schutzmethode gar nicht zur Geltung kommen können. So wäre es verfehlt, einen Distanzschutz, der Kurzschlüsse und Erdschlüsse erfassen kann, in einem Netz mit satter Nullpunktserdung einzubauen, dessen Leitungen auf Holzmasten ohne Erdung verlegt sind; genügende Erdschlußströme können unter solchen Umständen gar nicht auftreten.

Um erste Anhaltspunkte für die zweckmässige Wahl einer Schutzmethode in konkreten Fällen zu gewinnen, ist es nicht überflüssig, schutztechnisch einigermassen gleichwertige Schutzmethoden auf Grund ihres Arbeitsprinzipes zu vergleichen. Dadurch kann der Betriebsmann allerdings nicht der Aufgabe enthoben werden, letzten Endes seine Schlussfolgerungen nach den besonderen Eigenschaften seines eigenen Betriebes zu ziehen. Besonders die Kostenfrage wird durch die konkreten Verhältnisse des Einzelfalles stark beeinflusst. Ausserdem ist es selbstverständlich, dass die besondern Qualitäten der einzelnen Konstruktionen für eine solche Beurteilung erheblich ins Gewicht fallen und dass Entwicklungen auf diesem Gebiet einmal gezogene Schlussfolgerungen immer wieder modifizieren können.

Um eine Diskussionsbasis zu gewinnen, seien ansatzweise drei Güteklassen gekennzeichnet, für welche das Schutzbedürfnis der Netze typisch ist. Wir möchten Schutzmethoden für einfache, stabile Netze relativ niedriger Spannung, in denen unter allen Betriebsverhältnissen relativ hohe Kurzschlußströme auftreten, sodann für komplizierte, stabile Netze relativ hoher Spannung und Leistung mit stark veränderlichen Kurzschlußstromverhältnissen und schliesslich für Netze, die an der Stabilitätsgrenze arbeiten, unterscheiden.

In der ersten Art von Netzen kommen als Schutzmethoden Maximalstromzeitschutz und einfache Formen des Impedanzschutzes in Frage. Es kann kein Zweifel darüber bestehen, dass der Impedanzschutz dem Maximalstromzeitschutz qualitativ überlegen ist; ebenso sicher kommt er aber auch teurer zu stehen. Sobald man mit einem Maximalstromzeitschutz ohne Energierichtungsverriegelung auskommt, stellt ein Primärrelais mit guter Laufzeitpräzision geradezu eine ideale Lösung dar; wegen seiner direkten Wirkungsweise ist es gleichzeitig betriebssicher und billig. Für den kombinierten Maximalstromzeit- und Richtungsschutz kommt einzig die Verwendung von Sekundärrelais in Frage. Dabei ist es trotz der Richtungsrelais im Gegensatz zum Impedanzschutz nicht nötig, von den speisenden Stromwandlern grosse Genauigkeit auch im Bereich der hohen Kurzschlußströme zu verlangen, da hier eine eigentliche Leistungsmessung nicht vorgenommen wird; man kann daher zu

ihrer Speisung fast immer Stabstromwandler verwenden. Fallweise, z. B. in städtischen Kabelnetzen, wird man aus besonderen Gründen auch in Netzen der betrachteten Art für einzelne Strecken zu einem Differentialschutz greifen.

Netze der zweiten Art sind das typische Anwendungsgebiet von Distanz-, Differential- und Streckenschutz mit Hilfsstromverriegelung. Solange es sich um den Schutz einzelner Objekte handelt, besticht der Differentialschutz durch die Einfachheit des Prinzipes und seiner Organe, seine Empfindlichkeit, seine Raschheit, seine unbedingte Selektivität und seine Unempfindlichkeit für Störungen, die nicht Kurzschlusscharakter haben. Trotzdem kommt er wegen der Kosten für die Hilfsleitungen kaum in Frage, wo eine bestehende Einzel- oder Doppelleitung mit einem hochselektiven Schutz auszurüsten ist. Bei der Neuanlage einzelner Leitungen relativ geringer Länge oder beim Entwurf des gleichzeitigen Schutzes von mehr als zwei Parallelleitungen verdient er, berücksichtigt zu werden. Er fällt jedoch unseres Erachtens gänzlich ausser Betracht, wo es sich darum handelt, ein einheitliches Schutzsystem für ein ganzes Netz zu entwerfen. Einmal spricht dagegen die Kompliziertheit des Sammelschienendifferentialschutzes, sodann der völlige Mangel einer Schutzreserve. Um diese zu schaffen, muss man dem Differentialschutz ein zweites Schutzsystem überlagern, beispielsweise einen Maximalstromzeit- oder einen Impedanzschutz; man kann an diesen relativ bescheidene Anforderungen stellen, um ihn einfach zu halten. Trotzdem verliert der gesamte Schutz seine Einfachheit und seine Unempfindlichkeit gegen Pendelungen. Unter diesen Umständen dürfte es stets zweckmässiger sein, nur einen hochwertigen Impedanzschutz oder eventuell einen Streckenschutz mit Hilfsstromverriegelung einzubauen.

Der Streckenschutz mit Hilfsstromverriegelung über einen Hilfsdraht ist gegenüber dem Distanzschutz von vorneherein im Nachteil, wie der Längsdifferentialschutz, wo es sich darum handelt, einen Selektivschutz in ein bestehendes Netz einzubauen; die Kosten für die nachträgliche Hilfsdrahtverlegung dürften die Sache fast immer unausführbar machen. Bei Neuanlagen dagegen verdient er, berücksichtigt zu werden, besteht doch die Möglichkeit, die Hilfsdrähte ohne erhebliche Mehrkosten als isolierte Seelen im Erdseil zu verlegen. Auch das Problem der Schutzreserve macht hier weniger Schwierigkeit als beim Differentialschutz; ist es doch, wie wir schon erwähnt haben, ohne weiteres möglich, integrierende Bestandteile solcher Streckenschutzausrüstungen für diesen Zweck zu verwenden. Trotzdem halten wir den Hilfsdraht mit seiner Verletzbarkeit für einen so schwachen Punkt solcher Systeme, dass wir auch in dieser Gegenüberstellung dem Impedanzschutz den Vorzug geben. Fehlt etwas an einer Impedanzrelaisausrüstung, so sind alle Apparate und Verbindungen leicht zugänglich; Reparaturen des Hilfsdrahtes auf der Strecke dagegen sind sehr umständlich und können unter Umständen lange Betriebsunterbrüche nötig machen. Eine Gegenüberstellung von Impedanz- und Streckenschutz mit Hochfrequenzkupplung ist heute noch gegenstandslos; sollte er einmal praktische Bedeutung bekommen, so scheint uns ein solcher Vergleich in erster Linie eine Frage der Kosten und der Betriebssicherheit des Kupplungssystemes zu sein.

Die Frage nach der geeignetsten Schutzmethode für stabile Hochspannungsnetze konzentriert sich somit heute auf die Gegenüberstellung Impedanzzeit- und Impedanzstreckenschutz. Soweit man dabei von den konstruktiven Qualitäten konkurrierender Systeme und den besonderen Eigenschaften der Schaltungen absieht, wird diese Frage durch die Bewertung der Fähigkeit zur Distanzmessung entschieden. Trotzdem die Distanzmessung meistens keine hohe Genauigkeit besitzt, halten wir sie doch für eine so wertvolle Eigenschaft des Impedanzzeitschutzes, dass wir diesem den Vorzug geben. Die Zeiten, welche dadurch nach einer Störung bis zum Auffinden einer Defektstelle besonders bei langen Leitungen in wenig bewohntem Gebiet eingespart werden können, sind ganz erheblich. Man wird diesem Urteil die höhere mittlere Abschaltgeschwindigkeit des Streckenimpedanzschutzes entgegenhalten. Im entscheidenden Punkt, d. h. hinsichtlich der Fähigkeit, ein Ausser-Tritt-Fallen der Kraftwerke zu verhindern, ist jedoch der Gewinn unseres Erachtens nicht gross genug, um dem Streckenimpedanzschutz wirkliche Ueberlegenheit über den Impedanzzeitschutz zu verschaffen [7]).

Netze, welche nahe an der Stabilitätsgrenze arbeiten, benötigen einen ausgesprochenen Schnellselektivschutz. Unter diesem Gesichtspunkt hat man Differentialschutz, Streckenimpedanzschutz und Streckenschutz mit Hilfsstromverriegelung vornehmlich über leitunggerichtete Hochfrequenzkanäle einander entgegenzustellen. Obwohl die Entwicklung in diesem Gebiet noch vollständig im Fluss ist und Prophezeihungen auf technischem Gebiet meist ein erhebliches Mass unsicherer Elemente enthalten, neigen wir zur Ansicht, dass ein Schnellselektivschutz, welcher alle Störungsformen unabhängig von der Störungsstelle zu erfassen vermag, am ehesten auf dem Wege des Streckenschutzes mit Hilfsstromverriegelung zu erreichen ist.

Da die schwierige Frage des Schnellselektivschutzes in der Hauptsache durch Unsicherheiten in der Stabilität gewisser Netze Bedeutung gewonnen hat, ist es vielleicht nicht ganz abwegig, darauf hinzuweisen, dass die gesuchte äusserste Beschleunigung der Kurzschlussabschaltungen nur ein Weg ist, um heftige Leistungspendelungen und ein Ausser-Tritt-Fallen der Kraftwerke zu vermeiden. Es wäre bestimmt der Mühe wert, zu untersuchen, ob diese Pendelungsgefahr wirklich als unvermeidlich hingenommen werden muss, und ob nicht Mittel und Wege verfügbar sind, um sie durch geeignete Verbesserungen, wohl namentlich der Maschinenregler, zu beseitigen.

[7]) S. F. Holzach, Bull. SEV 1932, S. 645 ff.

Zum Schluss möchten wir noch eine allgemeine Frage aufwerfen. Bekanntlich ist es noch nicht sehr lange her, dass Schutzfragen bei Entwurf und Führung von Kraftwerkbetrieben als Nebensache behandelt wurden. Diese Einstellung hat sich bei den meisten Betriebsleitungen gründlich geändert. Man ist zur Einsicht gekommen, dass für die Behandlung solcher Fragen Spezialisten, und zwar hochqualifizierte Leute, benötigt werden. Wir möchten die Richtigkeit dieser Tendenz dadurch unterstreichen, dass wir nicht nur auf die theoretischen Schwierigkeiten der genannten Fragen hinweisen, sondern wiederholen, dass die Lösung konkreter Schutzfragen eingehende Kenntnis des Betriebes und der verfügbaren Schutzmittel voraussetzt. Beides dürfte unsere Studie zur Genüge belegen. Wegen dieses Zusammenhanges haben aber auch die konstruierenden Firmen eine eingehende Orientierung über Schwierigkeiten und Bedürfnisse der Betriebe nötig, wenn sie vollwertige Schutzmittel sollen schaffen können. Dass eine richtige Zusammenarbeit von Betriebsmann und Konstrukteur auf dem Gebiet der Schutztechnik auch volkswirtschaftlich von grossem Wert wäre, braucht wohl nur angedeutet zu werden.

Die Flussverteilung beim fünfschenkligen Transformator.

Von Dr. *J. Goldstein*, Zürich.

621.314.21

Bei Grosstransformatoren macht das Einhalten der durch die Bahnverwaltungen vorgeschriebenen maximalen Bauhöhe Schwierigkeiten. Man fand dadurch eine Lösung, dass Drehstromtransformatoren grosser Leistung fünfschenklig ausgeführt werden, wodurch die Höhe der Joche wesentlich reduziert werden kann.

Im folgenden werden Betrachtungen über die Vorausberechnung der Induktionen und die Aufteilung der Schenkelflüsse auf die Joche und die Aussenschenkel (die nur magnetischer Rückschluss sind und keine Wicklungen tragen) angestellt. Es werden ferner Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an fünfschenkligen Grosstransformatoren der AEG verwertet und mit den errechneten Werten verglichen.

Les hauteurs maximum prescrites par les entreprises de transports ferroviaires sont une source de difficultés pour la construction de gros transformateurs. Une solution de ce problème consiste à prévoir cinq colonnes pour les transformateurs triphasés, ce qui permet de réduire sensiblement la hauteur des culasses.

Dans cet article, l'auteur traite de la prédétermination de l'induction et de la répartition du flux dans les culasses et dans les deux colonnes supplémentaires (qui ne servent qu'à fermer le circuit magnétique et ne portent pas d'enroulements) et compare aux valeurs calculées les valeurs déterminées par des essais sur de gros transformateurs à cinq colonnes de l'AEG.

Allgemeines.

Bekanntlich hat die Fünfschenkel-Type im Grosstransformatorenbau eine grosse praktische Bedeutung für Drehstromtransformatoren erlangt. Durch die Anordnung des vierten und fünften Schenkels war man in der Lage, das Hauptjoch schwächer zu dimensionieren und in der Bauhöhe des Grosstransformators nicht unwesentliche Ersparnisse zu erzielen. Auf diese Ersparnisse in der Bauhöhe ist man angewiesen, wenn man den Transformator komplett im Kasten mit Oelfüllung bei nur abmontierten Durchführungen bahntransportfähig bauen will. So ist die Bauhöhe dem Konstrukteur als Höchstmass vorgeschrieben und er muss sich wohl oder übel mit der Bemessung der Joche und Jochsäulen (eine von Vidmar für den vierten und fünften Schenkel eingeführte Bezeichnung) befassen. Es handelt sich um eine Aufteilung der Schenkelflüsse in Teilflüsse. Dabei ist die Bestimmung der Sättigung, der Verluste und eine Einschätzung der Flusskurvenform in den Jochen und Jochsäulen, besonders aber eine Vorausberechnung der Verluste von grosser Wichtigkeit.

Es sind bereits einige Arbeiten über den fünfschenkligen Transformator veröffentlicht worden [1]). Eine erschöpfende Erforschung der schwierigen magnetischen Probleme findet man im Aufsatz von Vidmar [1]).

Vorliegende Arbeit behandelt nur einen kleinen Ausschnitt der Flussaufteilung auf Grund vereinfachter, auch für den nicht ganz Eingeweihten zugänglicher Vorstellungen. Ferner werden Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an fünfschenkligen Grosstransformatoren verwertet und mit den errechneten Werten verglichen. Nach dieser Methode kann man in erster Annäherung die Sättigung und Verluste im fünfschenkligen Transformator vorausberechnen. Wegen der Vorausberechnung der Flussverzerrungen in den Jochen und Jochsäulen kann auf die Arbeit von Stein [1]) verwiesen werden. Diese Fragen werden im Aufsatz nur durch oszillographische Aufnahmen erläutert.

1. *Das Flussdiagramm und die Flussaufteilung.*

Wir legen den weiteren Betrachtungen eine für Fünfschenkel-Transformatoren schon aus anderen Gründen praktisch allein in Frage kommende in Dreieck geschaltete Erregerwicklung zugrunde. Dadurch sind zunächst einmal die Flüsse in den drei Hauptschenkeln des fünfschenkligen Drehstromtransformators eindeutig festgelegt. Für die Flussverteilung in den Jochen und Jochsäulen sind die Kirchhoffschen Verzweigungsgleichungen anzuwenden. Dabei gelten die Betrachtungen für Momentanwerte und es ist die Phasenlage der Flüsse noch durch vektorielle Beziehungen zu ermitteln.

Wie im folgenden gezeigt werden soll, kann man durch eine Komponentenzerlegung [2]) die Rechnung in Anlehnung an einphasige Verhältnisse noch einfacher als oben angedeutet gestalten. Die drei Schenkelflüsse Φ_1, Φ_2, Φ_3 (Fig. 1) lassen sich

[1]) Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

[2]) Die Anregung zu diesem Verfahren verdanke ich Herrn Dr. Willheim.