Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 18 (1927)
Heft: 3

Artikel: Selektivschutz von Hochspannungsnetzen
Autor: Biermanns, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058614

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

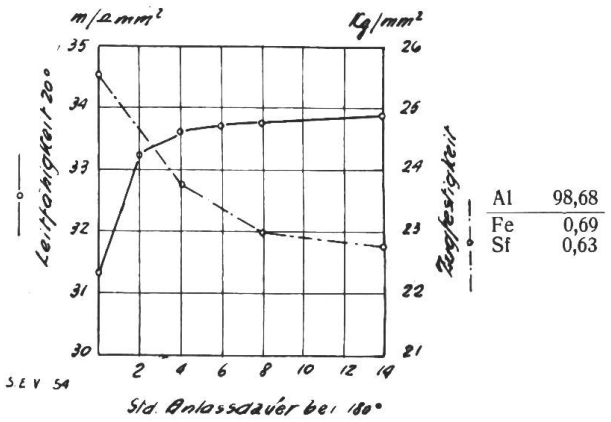

Fig. 19.

Was bei verschiedenen Aluminiumqualitäten durch eine solche Behandlung erreicht werden kann, geht aus den nachfolgenden in Fig. 13–19 graphisch dargestellten Beispielen hervor. Das mit der betreffenden Aluminiumqualität durch Glühung bei 300° C erreichbare Leitfähigkeitsmaximum ist in den Figuren durch eine gestrichelte Linie eingezeichnet.

Bei dem in Fig. 18 dargestellten Beispiele eines Aluminiums mit ca. 0,7 % freiem Silizium darf dieser Effekt schon als sehr erheblich bezeichnet werden, gelingt es hier doch das Material in einen Zustand überzuführen, in welchem dieses bei einer Leitfähigkeit von 34,5 m/Ω mm² noch eine Zugfestigkeit von 26 kg/mm² aufweist, also eine um ca. 30 % höhere Festigkeit als diejenige normaler hartgezogener Reinaluminiumdrähte.

Noch bedeutend höhere Effekte können nach diesem Verfahren erzielt werden, wenn an Stelle des Siliziums andere mit dem Aluminium mischkristallbildende Legierungskomponenten zulegiert werden, z. B. Kupfer oder noch besser *Magnesiumsilizid.* Auf diese Weise ist es gelungen, ein für Freileitungen hervorragend geeignetes Drahtmaterial herzustellen, welches bei einer Leitfähigkeit bei 20° C von 31 m/Ω mm² eine mittlere Festigkeit von 33–34 kg/mm² und eine Bruchdehnung von 6–8 % aufweist. Dieses Material das unter der Bezeichnung „Drahtlegierung 3" von der Aluminium-Industrie-A.-G. Neuhausen in den Handel gebracht wird, scheint berufen, Kupfer und Stahlaluminium aus dem Hochspannungs-Leitungsbau zu verdrängen.[11])

Selektivschutz von Hochspannungsnetzen.

Von *J. Biermanns,* Chefelektriker der AEG-Fabriken für Transformatoren und Hochspannungsmaterial, Berlin.

621.317.8 (005) + 621.317.4 (005).

Der Autor macht Mitteilungen über die Bedeutung des Ueberstromschutzes in Hochspannungsnetzen. Er bespricht die bisher gebräuchlichen Relais (Definitivzeit-Relais, abhängiges Ueberstromzeitrelais, Unterspannungszeitrelais) und erwähnt ihre Nachteile, um sodann ein neues Relais, das sog. Impedanz- oder Distanzrelais, in der von den Firmen Haefely, Basel und AEG Berlin entwickelten Form näher zu beschreiben. Die Auslösezeit dieses Relais ist proportional der Impedanz zwischen der Kurzschlusstelle und dem Aufstellungsort des Relais und praktisch unabhängig von der Kurzschlussstromstärke.

Der Autor sucht darauf an Hand einer Reihe von Beispielen nachzuweisen, dass das Relais den Anforderungen des Betriebes entspricht.

L'auteur parle d'abord de l'importance de la protection contre les surintensités dans les réseaux à haute tension. Il passe ensuite aux relais utilisés jusqu'ici (à temps fixe, à action différée suivant la surintensité ou la sous-tension) en signalant leurs inconvénients, puis il décrit un nouveau relai, dit relai d'impédance ou relai à distance, dans la forme que lui ont donnée la maison E. Haefely de Bâle et l'AEG de Berlin. Le temps de déclenchement de ce relai est proportionnel à l'impédance entre l'emplacement du relai et le court-circuit; il est pratiquement indépendant de l'intensité de court-circuit.

A l'aide d'une série d'exemples l'auteur cherche enfin à démontrer que le relai en question répond à toutes les exigences de l'exploitant.

Die Anwendung elektrischer Energie in den verschiedensten Wirtschaftszweigen hat in den letzten Jahren einen derartigen Umfang angenommen, dass heute die Elektrizitätswerke ein mitbestimmender Faktor im Wirtschaftsleben eines jeden

[11]) Legierter Aluminiumdraht „Drahtlegierung 3" (Mitteilung der Aluminium-Industrie A.-G. Neuhausen) Schweiz. Bauzeitung 87, No. 26, 26. Juni 1926.

Landes geworden sind. Wir wissen, dass dies für die Schweiz in ganz besonderem Masse gilt. Je mehr aber die gesamte Wirtschaft sich auf den Bezug elektrischer Energie einstellt, um so energischer wird die Forderung der Zuverlässigkeit der Energieversorgung erhoben. Die Sachlage ist heute so, dass die weitere Anschlussbewegung, insbesondere der Grossindustrie in ausschlaggebender Weise davon abhängen wird, inwieweit es den Elektrizitätswerken gelingt, die letztgenannte Forderung, die, wie man zugeben muss, für manche Industriezweige eine Lebensfrage ist, zu erfüllen.

Der Zusammenschluss von Zentralen, die weitgehende Vermaschung und Ringbildung der Netze sind Massnahmen, zu denen die Entwicklung im Sinne der vorstehenden Forderung folgerichtig hinführte; sie setzen aber als Grundbedingung für die Erreichung des gestellten Zieles eine zuverlässige Schutzeinrichtung voraus, die unvermeidliche Störungen im Uebertragungsnetz auf den kleinstmöglichen Umfang beschränkt. Die häufigsten vorkommenden Störungen sind aber Kurzschlüsse und in der Wirkung aufs Netz diesen gleichkommende Doppelerdschlüsse.

Ist demnach irgendwo in einem elektrischen Verteilungsnetz Kurzschluss eingetreten, so muss die Kurzschlusstelle sobald als möglich vom übrigen Netz abgetrennt werden; man hat als günstigste Zeit, die vom Eintritt des Kurzschlusses bis zu einer Abschaltung vergehen soll, 1 bis 2 Sekunden festgestellt, jedoch auch eine Auslösezeit von 4 Sekunden wird von jedem normalen Netz, wie die praktische Erfahrung gezeigt hat, noch anstandslos ertragen.

Die auffallenste Reaktion des Netzes auf den Kurzschluss ist das Auftreten eines Ueberstromes in den von den Stromerzeugern zu der Kurzschlusstelle führenden Leitungen. Man hat denn auch von Anfang an bei der Entwicklung der zur Abtrennung der Fehlerstelle bestimmten Einrichtungen von dieser Tatsache Gebrauch gemacht, so dass als Kriterium für ihr Ansprechen das Auftreten eines Ueberstromes gilt. Und zwar ist ihre Ansprechgrenze meist willkürlich innerhalb eines Intervalls verstellbar, das sich zwischen dem 1 – 2 fachen Wert des Nennstromes des zu schützenden Netzteiles erstrekt.

Die auftretende Schwierigkeit ist nun die, dass bei einem Netzkurzschluss im allgemeinen eine ganze Reihe von Leitungen vom Ueberstrom durchflossen werden, während entsprechend der Forderung der Praxis nach Selektivität der Schutzeinrichtung nur die fehlerhalfte Leitung allein abgetrennt werden soll. Man hat, um aus dieser Schwierigkeit einen Ausweg zu finden, zu dem Prinzip der Zeitstaffelung gegriffen, indem man den verschiedenen im Kurzschlusskreis aufeinanderfolgenden Auslöseeinrichtungen eine voneinander abweichende Auslösezeit gab, so, dass sich die kürzeste Auslösezeit in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle ergibt. Da nach dem Abschalten der Fehlerstelle der Ueberstrom verschwindet und sämtliche Auslöseeinrichtungen wieder in ihre Ruhestellung zurückgehen, wird hierdurch erreicht, dass tatsächlich nur der fehlerhafte Netzteil allein zur Abtrennung gelangt. Die Praxis hat gezeigt, dass ein Auslösen der Schalter in der richtigen Reihenfolge nur dann mit Sicherheit erzielt wird, wenn die Zeitstaffelung, d. i. die Differenz der Auslösezeiten zweier aufeinanderfolgender Schalter, 1 ÷ 2 Sekunden beträgt.

So einfach das geschilderte Ueberstromzeitprinzip in seiner Grundlage erscheint, so schwierig war jedoch seine Verwirklichung in der Praxis. Wir sehen das am besten, wenn wir kurz auf die Entwicklung des Auslöserelais eingehen, wie sie sich bis zum heutigen Tage abgespielt hat. Von der primitivsten Form der Ueberstromauslösung, nämlich von der Abschmelzsicherung, ging man bald zu den selbsttätig wirkenden Schaltern über, die entweder sofort wirksam waren oder deren Auslöseelement mit einer Zeitverzögerung ausgestattet war. Vielfach war die im übrigen willkürlich einstellbare Auslösezeit unabhängig von der eintretenden Stromstärke, und man erstrebte in der Weise eine zweckentsprechende Auswahl der auslösenden Schalter, dass man die Auslöseelemente von der Zentrale beginnend nach der Fehlerstelle hin in passender Weise abstufte, darart, dass die Auslösezeit des der Zentrale zunächst gelegenen Schalters am grössten, die des Schalters am Leitungsende am

kleinsten war. Diese Art des Ueberstromschutzes war natürlich nur bei von der Zentrale ausgehenden einfachen Leitungssträngen, also bei dem sog. Radialleitungssystem, anwendbar. Es lässt sich denken, dass sich bei vielen in einer Leitung hintereinander liegenden Stationen für die in der Nähe der Zentrale liegenden Schalter sehr grosse Auslösezeiten ergaben, die gerade an dieser Stelle, wo ein Kurzschluss naturgemäss die stärksten Rückwirkungen auf das Netz ausüben muss, besonders unangenehm waren. Als Aushilfsmittel stattete man deshalb die sog. unabhängigen Zeitschalter mit einer Zusatzeinrichtung aus, die bei starken Ueberströmen, also bei direkten Kurzschlüssen, das Zeitwerk ausser Tätigkeit setzte und den Schalter sofort auslöste. Natürlich war dann bei einem Kurzschluss stets der ganze Leitungsstrang ausser Betrieb gesetzt, die Betriebsstörung war also eine äusserst empfindliche, ferner hat die unverzögerte Unterbrechung eines Kurzschlusses noch weitere Nachteile im Gefolge, die in erster Linie in einer ausserordentlich starken Beanspruchung des unterbrechenden Schalters bestehen. Man hat aus diesen Gründen die letzterwähnte Zusatzeinrichtung wieder vollkommen verlassen.

Um von den unangenehm langen Auslösezeiten der unabhängigen selbsttätigen Schalter abzukommen, verwandte man sog. abhängige Auslöseeinrichtungen, das sind Relais, deren Auslösezeit zwar auf einen bestimmten willkürlichen Wert eingestellt werden kann, bei welchen jedoch der einmal eingestellte Wert eine Funktion der Stromstärke ist, derart, dass mit zunehmender Stromstärke die Auslösezeit abnimmt. Je heftiger also der Kurzschluss ist, um so rascher löst der Schalter aus. Diese Relais entsprechen dem Schutzbedürfnis des Leitungsnetzes selbst besser, da bei höheren Stromstärken die Gefährdung durch allzustarke Erwärmung grösser wird und infolgedessen in diesem Falle eine schnelle Abschaltung erwünscht ist. Indessen muss jedoch mit dem eben geschilderten Vorteil ein schwerwiegender, gerade die Selektivität der Auslösung betreffender Nachteil in Kauf genommen werden. Mit der Stromstärke sinkt nämlich nicht nur die Auslösezeit an sich, sondern auch die Differenz der Auslösezeiten der Schalter zweier benachbarter Stationen, also die Staffelung. Bei sehr hohen Strömen kann die letztere so geringe Werte annehmen, dass mehrere in der Leitung aufeinanderfolgende Schalter gleichzeitig herausfallen, so dass also die gewünschte selektive Wirkung wenigstens zum Teil vereitelt wird.

In den sog. abhängigen Ueberstromzeitrelais steckt jedoch bereits ein Prinzip von allgemeiner Bedeutung, das ihnen bis zu einem gewissen Grade die Fähigkeit der selbsttätigen Auswahl fehlerhafter Leitungsstrecken in einem vermaschten Netz verleiht. In einem vermaschten Netz mit z. B. zwei Kraftwerken und zwei Speisepunkten entsprechend Fig. 1 fliesst der Fehlerstrom bei Kurzschluss an irgendeiner Stelle des Netzes von allen Seiten der Kurzschlussstelle zu und erreicht demnach sein Maximum in der kranken Leitung. Werden die Schalter dieses Netzes mit Ueberstromzeitrelais ausgerüstet, deren Auslösezeiten mit zunehmenden Fehlerströmen abnehmen, so wird eine gewisse Staffelung der Auslösezeiten erhalten.

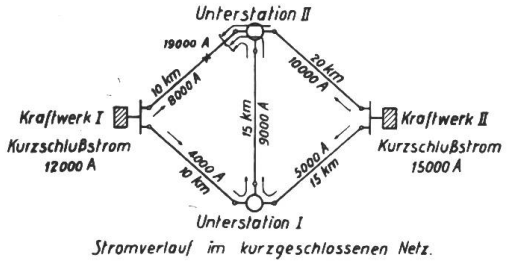

Fig. 1.

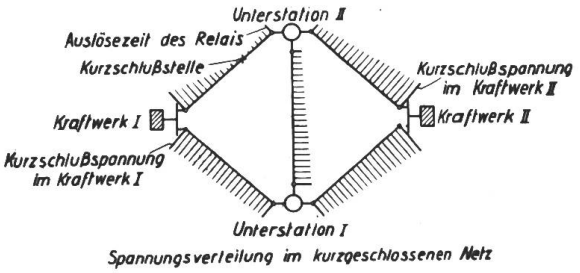

Fig. 2.

Je mehr man sich der Fehlerstelle nähert, um so mehr nehmen die Auslösezeiten ab. Bei wenig vermaschten Netzen kann jedoch das Prinzip der Stromabhängigkeit allein noch keine befriedigende Lösung der Selektivschutzfrage bieten, während

dagegen in stark vermaschten Netzen mit stromabhängigen Relais schon recht gute Betriebsergebnisse erzielt wurden.

In ähnlicher Weise suchte man eine Staffellung der Auslösezeiten in Abhängigkeit von der Spannungsverteilung beim Kurzschluss zu erreichen. Fig. 2 zeigt den Spannungsverlauf bei Kurzschluss eines von zwei Kraftwerken gespeisten Netzes; im Kurzschlusspunkt herrscht die Spannung Null, sie nimmt jedoch nach den Speisepunkten hin stetig zu; da der Kurzschlusstrom vermöge der Impedanz der Zuführungsleitungen einen durch das Ohmsche Gesetz gegebenen Spannungsabfall erzeugt. Ueberstromrelais, deren Auslösezeit entsprechend Fig. 3 mit abnehmender Spannung gleichfalls abnimmt, geben also ebenfalls ein Mittel, um eine selektive Wirkung zu erzielen. Sie besitzen gegenüber dem stromabhängigen Relais den Vorteil, dass sie nicht so grosse Ansprüche an die Vermaschung des Netzes stellen, und dass sie besonders bei einfachen Ringnetzen mit gutem Erfolg verwendet werden können. Ein Nachteil derselben jedoch soll nicht unerwähnt bleiben. Der Spannungsabfall einer Leitung ist proportional der Stromstärke. Bei gleichbleibender Leitungslänge wächst also die Auslösezeit des Relais mit der Stromstärke. Das Verhalten des Relais entspricht mithin in diesem Punkte in keiner Weise dem Schutzbedürfnis des Leitungsnetzes.

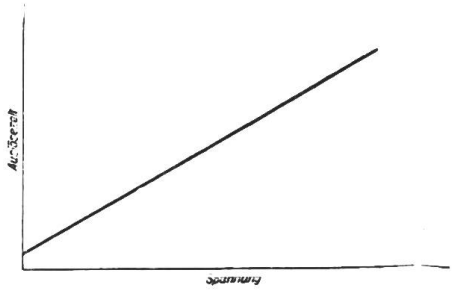

Fig. 3.
Charakteristik eines spannungsabhängigen Relais.

In einem wichtigen Falle versagen sowohl das strom- als auch das spannungsabhängige Relais vollkommen, nämlich in der einfachen Durchgangsstation, wie diese durch die Fig. 4 charakterisiert wird. Tritt in der Nähe dieser Station ein Fehler auf, so wird in der nach der Fehlerstelle gehenden Leitung der Strom von den Sammelschienen weg gerichtet sein, während er in den ankommenden gesunden Leitungen den Sammelschienen zu gerichtet ist. Da die in beiden Leitungsenden liegenden Relais nicht nur gleiche Spannung, sondern auch gleiche Stromstärke vorfinden, so werden die Prinzipien der Strom- und Spannungsabhängigkeit versagen. Erst nach Hinzunahme des Prinzips der Stromrichtungsabhängigkeit wird die richtige Auswahl des auszulösenden Schalters möglich. Besitzen nämlich die Schalter beider Leitungen Energierichtungsrelais, die den Schalter nur dann auslösen, wenn der Strom von den Sammelschienen wegfliesst, so ist ohne weiteres einzusehen, dass nur die fehlerhafte Leitung von den Sammelschienen der Station abgetrennt wird, während die Belieferung der Station durch die ankommende gesunde Leitung weiterhin sichergestellt bleibt. Die Energierichtungsrelais sind speziell im Zusammenhang mit spannungsabhängigen Relais schon mehrfach in der Praxis benutzt worden.

Fig. 4.
Stromrichtung in einer Durchgangsstation.

Von den eben beschriebenen verschiedenen Lösungen der Selektivschutzfrage erfüllt wohl keine alle Forderungen, die die Praxis zu stellen gezwungen ist und die da sind: Einfachheit, Betriebsicherheit und Unabhängigkeit vom jeweiligen Betriebszustand und von der jeweiligen Gestaltung des Netzes. Der geschilderte Entwicklungsgang lässt die Grösse der zu überwindenden Schwierigkeiten erkennen, er deutet aber auch zwangläufig auf diejenige Lösung hin, die nach dem heutigen Stand der Erkenntnis allein die eben aufgestellten Forderungen zu erfüllen vermag. Und zwar beruht diese Lösung auf der Zusammenfassung aller derjenigen zur Feststellung der Fehlerstelle verwendbaren Prinzipien, die durch die natürlichen Eigenschaften eines jeden Leitungsnetzes gegeben sind. Wir kennen diese Prinzipien bereits durch die vorhergehenden Erörterungen; es handelt sich nämlich um die Prinzipien der Stromabhängigkeit, der Spannungsabhängigkeit und der Stromrichtungsabhängigkeit. Es ist ohne weiteres einleuchtend, dass ein Relais, welches

die drei vorgenannten Prinzipien vereinigt, die meisten Aussichten für die richtige Auswahl des kranken Netzteiles bietet. Die Schwierigkeit wird darin bestehen, trotz der Vereinigung sämtlicher drei Prinzipien eine genügende Einfachheit des Selektivrelais zu wahren.

Auf Grund der angestellten Ueberlegungen lassen sich bereits die Eigenschaften eines zweckentsprechenden Selektivrelais voraussagen. Seine Auslösezeit muss mit wachsender Stromstärke abnehmen, während sie mit zunehmender Spannung zunehmen muss. Es ergibt sich demnach, wenn man lineare Abhängigkeit, die, wie wir gleich sehen werden, besondere Vorteile bietet, voraussetzt, folgende Gleichung für die Auslösezeit des Relais:

$$T = \frac{e}{i}.$$

Die Auslösezeit des Relais soll also proportional dem Quotienten aus Leitungsspannung und Leitungsstrom sein. Dieser Quotient stellt aber die Impedanz der Leitung dar, und da die Impedanz pro Längeneinheit in der Regel konstant ist, oder doch sich nur wenig ändert, ist die Auslösezeit proportional der Leitungslänge. Die Auslösezeit des Relais wird also in der Nähe der Fehlerstelle ein Minimum sein und nimmt mit wachsender Entfernung von der Fehlerstelle stetig und proportional der Leitungslänge zu. Das Relais wird ferner entsprechend der dritten der aufgestellten Forderungen stromrichtungsabhängig sein müssen, d. h. bei auf die Sammelschienen zu gerichtetem Strom läuft das Relais gegen einen Anschlag, ohne den Auslösekontakt zu betätigen. Man versteht also, weshalb das so charakterisierte ideale Selektivrelais als Impedanz- oder auch Distanzrelais bezeichnet wird.

Es sind in der letzten Zeit verschiedene Konstruktionen des Impedanzrelais herausgebracht worden, wir wollen uns indes auf die Beschreibung derjenigen Konstruktion beschränken, die die weiteste Verbreitung gefunden hat und die von den Firmen Emil Haefeli in Basel und AEG Berlin ausgeführt wird.

Bei einem Rückstromrelais nach dem Ferraris-Prinzip ist das auf die Triebscheibe ausgeübte Drehmoment proportional dem Produkt aus Strom und Spannung. Ist die Scheibe sich selbst überlassen, so wird die sich unter dem Einfluss der Antriebskraft ergebende Drehzahl begrenzt durch die Wirbelstromdämpfung, die die Scheibe im magnetischen Feld der Triebkerne erfährt. Diese bremsende Kraft ist proportional dem Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit der Scheibe und der Summe der Quadrate der Kraftlinienflüsse des Strom- und Spannungskernes oder, abgesehen von zwei Proportionalitätsfaktoren, proportional der Summe der Quadrate von Strom und Spannung. Nun sind bei dem vorliegenden Distanzrelais die Verhältnisse so gewählt, dass der Spannungskern sehr kräftig, der Stromkern dagegen sehr schwach ausgebildet ist. Das Quadrat des Kraftlinienflusses des Stromkernes kann also gegenüber dem des Spannungskernes vernachlässigt werden, und die sich ergebende Ablaufzeit der Relaisscheibe ist, abgesehen von einem Proportionalitätsfaktor:

$$T = \frac{e^2}{e\,i} = \frac{e}{i},$$

das ist, wie man sieht, gerade die Charakteristik des idealen Impedanzrelais. Das Relais ist, da es seinem Aufbau nach ein Wattrelais ist, selbstverständlich auch stromrichtungsabhängig.

Wie in Fig. 5 schematisch dargestellt ist, wird mit dem oben beschriebenen Impedanzrelais noch ein Stromrelais verbunden, das im Kurzschlussfalle die Aluminiumscheibe anwirft. Wenn der Triebkern kein Drehmoment auf die Scheibe ausübt, wenn also der Kurzschluss in unmittelbarer Nähe des Relais liegt, so dass die Spannung am Relais gleich Null ist, nimmt die Scheibe unter dem Impuls des Stromrelais eine Grenzdrehzahl an, die der kürzesten Auslösezeit des Relais ent-

spricht. Proportional dem Spannungsanstieg längs der Impedanz der Leitung gewinnt der Triebkern einen wachsenden Einfluss auf die Drehgeschwindigkeit der Scheibe und erzwingt so eine Staffelung der hintereinanderliegenden Relais entsprechend ihren Abständen von der Fehlerstelle. Sobald der Kurzschluss abgeschaltet ist, wird die Aluminiumscheibe in ihre Ruhestellung zurückgedreht und eine mechanische Verriegelung der von der Scheibe betätigten Fallklappenauslösung bewirkt. Das Auslöseverhältnis, d. i. das Verhältnis des Ansprechstromes zum Strom, bei dem das Relais in seine Ruhestellung zurückgeht, ist durch besondere konstruktive Massnahmen niedrig gehalten, um mit der Ansprechstromstärke nahe an die Volllaststromstärke herangehen zu können, und entspricht dem vom Verband deutscher Elektrotechniker vorgeschlagenen Wert.

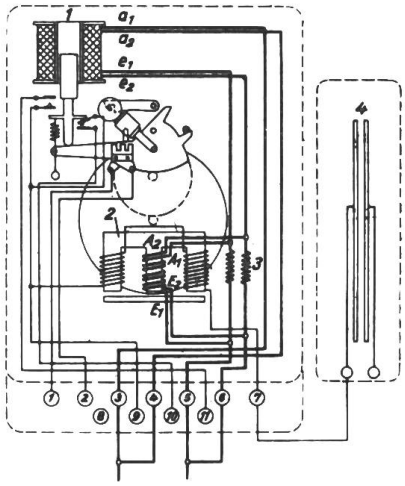

Fig. 5.
Schematische Darstellung des Impedanz-Relais.

Zur Aufrechterhaltung der Selektivität im Falle eines Kurzschlusses in der Nähe von geschützten Stationen ist eine hohe Spannungsempfindlichkeit des Relais erforderlich. Aus diesem Grunde ist der Spannungskreis als Schwingungskreis ausgebildet, indem in Reihe mit der Spannungswicklung ein Kondensator geschaltet wird. Durch diese Anordnung wird die Richtkraft des Impedanzrelais noch bei 1% der normalen Netzspannung sichergestellt. Dieser Spannungswert ist, wie wir noch sehen werden, bereits bei Kurzschluss über einen Lichtbogen in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle vorhanden, so dass hierbei das Impedanzrelais in jedem Falle, auch bei Kurzschluss in unmittelbarer Nähe des Relais, energierichtungsabhängig ist.

Die Auslösezeit des Relais wächst praktisch proportional mit der Leitungslänge zwischen Fehlerstelle und Relais und ist fast völlig unabhängig von der auf das Netz arbeitenden Maschinenleistung; die Fig. 6 und 7 lassen dies erkennen. Fig. 6 zeigt die Auslösezeit des Relais für verschiedene Werte der Impedanz der Leitung zwischen Relaisort und Fehlerstelle in Abhängigkeit von der Stromstärke. Sowohl die Werte für die Impedanz als für die Stromstärke beziehen sich auf die sekundären Kreise von Strom- und Spannungswandlern, für die als Normalwerte 5 A und 110 V angenommen sind. Die gestrichelt eingezeichnete Begrenzungskurve zeigt an, dass für den von ihr berührten jeweiligen Versuchspunkt die normale Spannung von 110 V erreicht ist und dass infolgedessen eine Fortführung der Kurve über diesen Punkt hinaus praktisch keine Bedeutung mehr hätte. Wie man sieht, ist bei gegebener Impedanz die Abhängigkeit von der Stromstärke nur gering und kann für praktische Zwecke unbedenklich vernachlässigt werden. Aus dem Grunde wurde mit Hilfe der Fig. 6 die in Fig. 7 dargestellte charakteristische Auslösekurve des Distanzrelais aufgestellt. Die eingetragenen Impedanzwerte beziehen

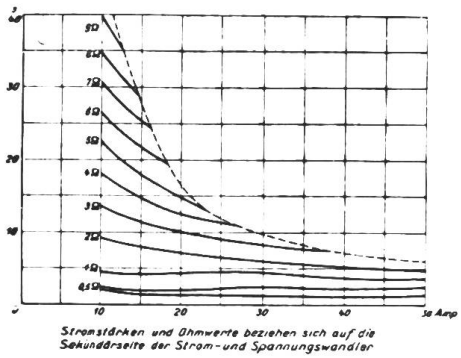

Fig. 6.
Charakteristische Kurven des Impedanz-Relais.

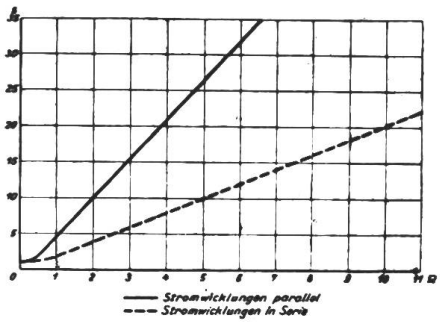

Fig. 7.
Auslöse-Charakteristik des Impedanz-Relais.

sich auch hier auf die Sekundärstromkreise der Wandler; der normalen Spannung und dem normalen Strom entspricht also eine Impedanz von $\frac{110}{5} = 22$ Ohm.

Fig. 8 zeigt den konstruktiven Aufbau des vorbeschriebenen Distanzrelais.

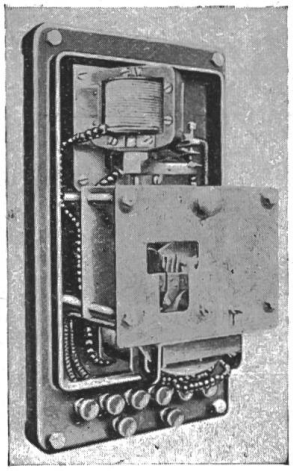

Fig. 8.
Konstruktiver Aufbau des Impedanz-Relais.

Das Impedanzrelais wird so geschaltet, dass ihm bei Kurzschluss die verkettete Spannung der kurzgeschlossenen Phasen zugeführt wird. Diese ist an der Kurzschlusstelle am niedrigsten und steigt von da aus nach dem Kraftwerk stetig an. Durch diese Anordnung ist Gewähr für eine gute Staffelung der Relais bei normalen Kurzschluss gegeben. In Freileitungsnetzen tritt jedoch vielfach eine andere Störungsform häufiger auf, der sog. Doppelerdschluss. Seine Entstehung ist meist darauf zurückzuführen, dass bei einem Erdschluss im Netz die Isolation einer nicht erdgeschlossenen Phase an einer schwachen Stelle unter der erhöhten Beanspruchung versagt und so einen Kurzschluss über Erde einleitet. Das Bild der Spannungsverteilung für gleichzeitigen Erdschluss auf zwei Phasen wird durch Fig. 9 – der Einfachheit halber zweiphasig gezeichnet – wiedergegeben. An den Erdungsstellen ist die Spannung gleich Null. Längs der vom Kurzschlusstrom durchflossenen Leitung steigt sie entsprechend dem Ohmschen Widerstand und der aus Leitung und Erde gebildeten Schleifeninduktivität nach dem Kraftwerk zu stetig an. Der Kurzschlusstrom der einen Phase induziert ausserdem in der parallelen Phase eine zusätzliche Spannung, für deren Höhe die gegenseitige Induktion der Leiter massgebend ist. Man erkennt, dass die Spannung zwischen den Leitern auch an der Erdungsstelle nicht gleich Null wird, sondern ganz erhebliche Werte besitzt. Die Auslösezeiten des Relais würden also in diesem Störungsfalle beim Anschluss an die verkettete Spannung einerseits sehr hoch und andererseits die Staffelung der Relaiszeiten sehr klein werden. Deshalb ist die Schaltung des Relais so getroffen, dass es bei Ueberstrom in einer Phase, der nach Fig. 9 ein charakteristisches Merkmal des Doppelerdschlusses ist, an die Spannung Phase gegen Erde gelegt wird. Dadurch ergibt sich wieder eine Staffelung der Relais von der Fehlerstelle aus wie beim normalen Kurzschluss. Fig. 10 lässt die Spannungsverteilung bei Doppelerdschluss in einer Ringleitung erkennen. Das Verhältnis $\frac{e}{i}$ ist hierbei ungefähr dasselbe wie beim normalen Zweiphasenkurzschluss.

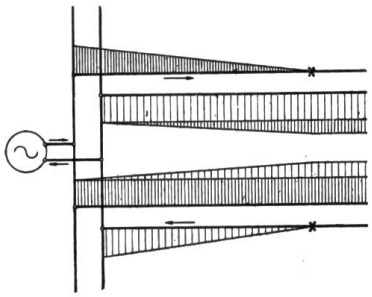

Fig. 9.
Strom- und Spannungsverteilung bei Doppelerdschluss.

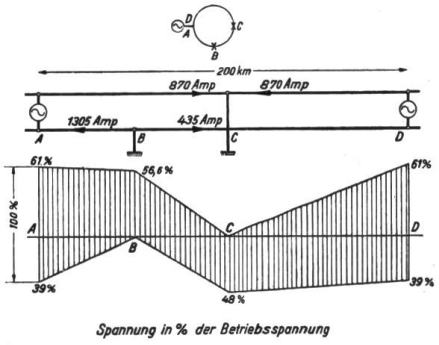

Fig. 10.
Strom- und Spannungsverteilung bei Doppelerdschluss in einem Ringnetz.

Aus Fig. 11 ist zu ersehen, wie die Umschaltung des Distanzrelais bei Doppelerdschluss erreicht wird. Der Umschaltkontakt wird (vergl. Fig. 5) durch den Kern der Stromrelais betätigt und liegt an Erde, wenn sich das Relais im Ruhezustand befindet. Wird nur eine Phase, wie bei Doppelerdschluss, vom Ueberstrom durchflossen, so zieht der Stromkern an und legt die Spannungswicklung des Relais an die zugehörige Phasenspannung. Bei zweiphasigem oder dreiphasigem Kurzschluss dagegen wird die verkettete Spannung angelegt.

Durch diese einfache Anordnung wird sogar die selektive Abschaltung eines einfachen Erdschlusses erreicht, wenn der Erdschlusstrom derart hohe Werte besitzt, dass er das Ueberstromrelais zum Ansprechen bringt.

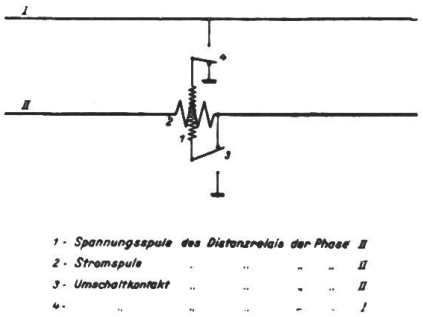

Fig. 11.
Umschaltung bei Doppelerdschluss.

Das vorstehend beschriebene Impedanzrelais ist seinem Wesen nach ein Ueberstromrelais, das heisst, es tritt nur dann in Funktion, wenn auf der geschützten Leitungsstrecke der Betriebsstrom seinen normal zulässigen Wert übersteigt, wenn also ein Ueberstrom auftritt. Und zwar wird das Impedanzrelais dadurch in Funktion gesetzt, dass der Anker des in Fig. 5 links oben gezeichneten Stromrelais in das Solenoid hineingezogen wird, die Einstellung der Ansprechstromstärke, die willkürlich zwischen 5 und 20 A gewählt werden kann (5 A = Nennstromstärke), wird in der üblichen Weise durch Regelung einer Federkraft mittels des in Fig. 8 zu sehenden Drehknopfes bewirkt. Der Kurzschlusstrom muss also bei empfindlichster Einstellung mindestens die Höhe der Nennstromstärke der geschützten Leitungsstrecke erreichen, wenn das Impedanzrelais in seiner normalen Ausführung überhaupt in Tätigkeit treten soll.

Es gibt nun Anlagen mit ungünstigen Belastungsverhältnissen, bei denen die oben getroffene Voraussetzung nicht immer erfüllt ist. Freileitungsnetze mit überwiegend ländlichem Versorgungsgebiet verfügen unter Umständen über ein ausgedehntes Versorgungsgebiet, das jedoch Nachts und an Sonntagen nur sehr geringen Energiebedarf hat. Die wenigen, zu diesen Zeiten in Betrieb befindlichen Generatoren sind wegen des grossen Ladestromes des Netzes nur schwach erregt, geben also im stationären Kurzschluss nur einen sehr geringen Kurzschlusstrom ab. So kommt es, dass in manchen Netzen der Dauerkurzschlusstrom nur ein kleiner Bruchteil des Nennstromes der betroffenen Leitungsstrecke ist; das Impedanzrelais wird in solchen Fällen bei Kurzschluss des Stosskurzschlusstromes wegen wohl zunächst anziehen, aber vor erfolgter Abschaltung wieder in seine Ruhelage zurückkehren. In Netzen der betrachteten Art besteht also die Gefahr, dass ein Kurzschluss überhaupt nicht abgeschaltet wird, dass also der gesamte Betrieb beeinträchtigt wird.

Impedanzrelais mit normaler Ueberstromcharakteristik sind also für derartige Netze nicht ohne weiteres geeignet, sie bedürfen indes nur einer geringen Aenderung, die an Hand der Fig. 12 und 13 erläutert werden möge. Die erstgenannte Figur zeigt die normale Ausführung des Ansprechsystemes; das vom Ansprechstrom *i* durchflossene Solenoid arbeitet gegen die willkürlich verstellbare Kraft einer Feder *F*, durch deren Spannung sonach der Ansprechstrom ein für allemal festgelegt ist. Hingegen zeigt Fig. 13 das geänderte Ansprechsystem, bei dem die Feder *F* durch ein weiteres, jedoch an der Netzspannung *e* liegendes Solenoid ersetzt ist. Die Gegenkraft sinkt jetzt mit abnehmender Spannung und man erreicht hierdurch, dass das Impedanzrelais nunmehr bei voller Spannung, also bei Ueberlastungen erst beim doppelten Nennstrom auslöst, während es bei stark gesunkener Spannung, also bei Kurzschlüssen bereits bei 20 % der Nennstromstärke auslöst. Damit ist aber selbst den weitgehendsten Ansprüchen Genüge getan.

Fig. 12.
Reine
Ueberstromcharakteristik

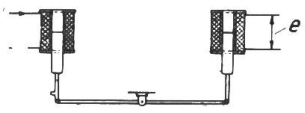

Fig. 13.
Spannungsabhängige
Ueberstromcharakteristik

Das Impedanzrelais hat von seiner Geburt an viele Anfeindungen ausstehen müssen; indes soll nur kurz auf die zwei Hauptpunkte eingegangen werden, die gegen das Impedanzrelais ins Feld geführt wurden. Einmal wurde behauptet, die

Wirkungsweise werde ausserordentlich durch die Tatsache beeinflusst, dass bei Lichtbogenkurzschlüssen die Kurvenform von Spannung und Strom ausserordentlich verzerrt werde und dass hierdurch die Auslösezeiten der Impedanzrelais so gefälscht würden, dass diese ganz wahllos durcheinander fallen. Die Antwort auf diese Behauptung gibt Fig. 14, die zwei die Auslösezeit des Relais als Funktion der Spannung darstellende Kurven zeigt, wobei bei Aufnahme der oberen Kurve der Spannungskreis des Relais direkt an den Elektroden eines Lichtbogens lag, während die untere Kurve sich auf rein sinusförmige Spannung und sinusförmigen Strom bezieht. Obwohl die Spannungskurve des Lichtbogens fast rechteckförmig war und zahlreiche Oberschwingungen enthielt, wie das in der Figur enthaltene Oszillogramm erkennen lässt, weichen die beiden eingezeichneten Kurven nur sehr wenig von einander ab und fallen, insbesondere im unteren für die Auslösung in Betracht kommenden Bereich, fast völlig zusammen. Ferner wurde behauptet, der Kurzschlusslichtbogen könne leicht derartig hohe Widerstandswerte annehmen, dass sich unzulässig lange Auslösezeiten für die Distanzrelais ergäben. Auch diese Behauptung widerlegt man am besten durch das Experiment. In der Kurzschlussversuchsanlage der AEG wurden eingehende Versuche gemacht, aus denen folgende zwei extreme Fälle herausgegriffen seien:

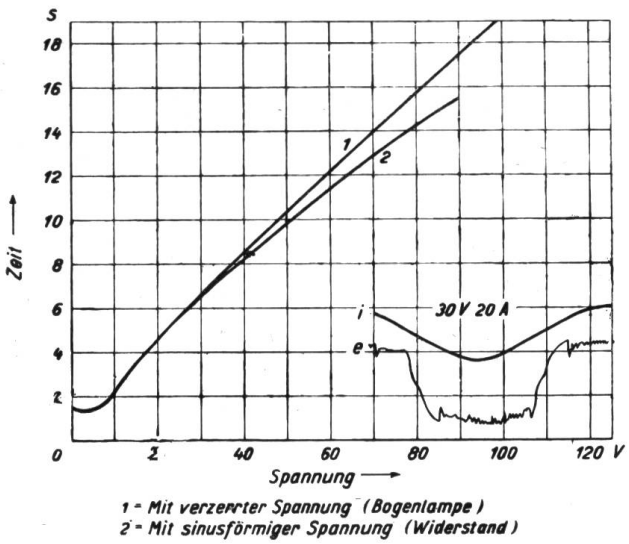

Fig. 14.
Einfluss der Kurvenform auf die Charakteristik der Impedanz-Relais.

Das in Fig. 15 gezeigte Oszillogramm, das Spannung und Strom eines Kurzschlusslichtbogens darstellt, wurde an einer 110 kV-Durchführung aufgenommen, an der ein künstlicher Ueberschlag eingeleitet worden war. Der Lichtbogen wurde von einem mit Vollasterregung laufenden 15000 kVA-Generator über einen gleich grossen 100000 V-Transformator gespeist. Die Leitungsführung war so, dass der Lichtbogen an der im Freien befindlichen Durchführung sich weit ausdehnen konnte und eine Länge von 6–7 m annahm. Trotz dieser grossen Lichtbogenlänge stieg die Lichtbogenspannung nicht über 3000 V, das sind 3% der normalen Spannung. Hierbei war die Stromstärke mit 350 A noch sehr niedrig. Bei höheren Stromstärken würde die Lichtbogenspannung noch niedriger ausfallen. Aber schon durch die im vorliegenden Falle

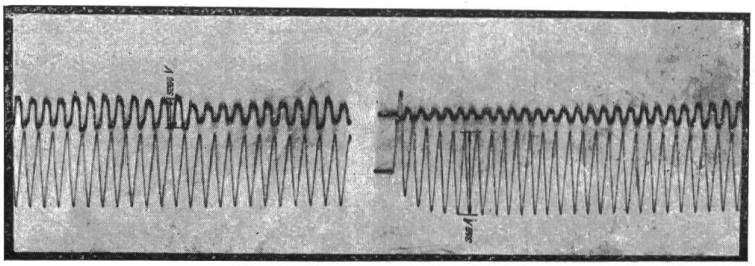

Fig. 15.
Oszillogramm eines Isolatorüberschlages.

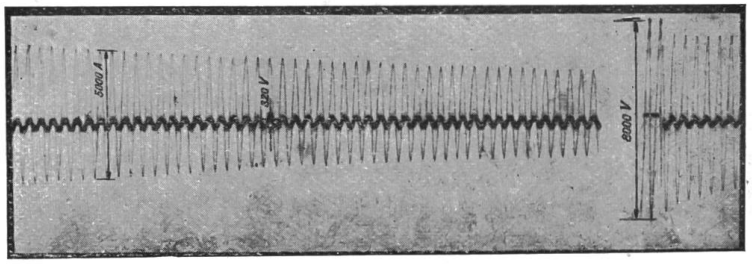

Fig. 16.
Oszillogramm eines Kabeldurchschlages.

gemessene Lichtbogenspannung wird die Auslösezeit des Impedanzrelais nicht nennenswert verlängert.

Einen weiteren Fall zeigt das Oszillogramm der Fig. 16, das Spannung und Strom an der Durchschlagsstelle eines 30 kV-Kabels zeigt. Bei einer Stromstärke von 5000 A beträgt die Höhe der Lichtbogenspannung 320 V, das sind etwa 1 % der normalen Spannung des Kabels. Die eben gemessene Spannung veränderte sich wenig mit den Dimensionen des Kabels, und sie war beispielsweise bei einem Kabel für 3000 V Betriebsspannung nur ganz unwesentlich niedriger.

Die eben mitgeteilten Versuche sind auch für die Beurteilung eines weiteren Vorwurfes von Bedeutung, der dem Impedanzrelais gemacht wurde, das ist die Rückstromempfindlichkeit des Relais. Die Rückstromempfindlichkeit beträgt 1 %, d. h. wenn die Spannung am Relaisort auf 1 % ihres normalen Wertes sinkt, wird das Relais noch richtig gesperrt, wenn der Strom auf die Sammelschienen zufliesst. Nun zeigen die Oszillogramme, dass mit diesem Spannungswert wohl in allen Fällen gerechnet werden kann und dass somit stets eine ausreichende Rückstromempfindlichkeit des Relais garantiert ist.

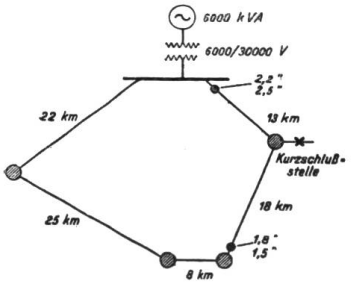

Fig. 17.
Lichtbogenkurzschluss in einem 30 kV-Netz.

Das Impedanzrelais ist bereits in zahlreichen Netzen in über 4000 Exemplaren in Betrieb. Bei der Inbetriebsetzung wurden nach Möglichkeit Fehlerversuche vorgenommen, von denen nachstehend einige herausgegriffen sein mögen:

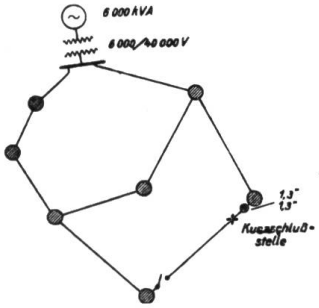

Fig. 18.
Lichtbogenkurzschluss in einem 40 kV-Netz.

Fig. 17 zeigt ein 30000 V-Ringfreileitungsnetz, in dem an der gezeichneten Stelle ein Kurzschluss hergestellt wurde, und zwar einmal metallisch und dann über einen Lichtbogen, der nach Aussage mehrerer Beobachter eine Länge von mindestens 5 m besass. Von den in die Figur eingeschriebenen Auslösezeiten beziehen sich die oberen Zahlen auf den metallischen Kurzschluss, die unteren auf den Lichtbogenkurzschluss, und man sieht, dass die Unterschiede innerhalb der Messgenauigkeit der Stoppuhr liegen. Eine merkliche Zunahme der Auslösezeit unter dem Einfluss des Lichtbogens hat also nicht stattgefunden. Den gleichen Fall zeigt Fig. 18 für ein 40 kV-Netz. Die Auslösezeiten waren in beiden Fällen genau dieselben. Die Versuchsanordnung im letzteren Falle zeigt Fig. 19, die ebenfalls Photographien des Lichtbogens wiedergibt. Der Versuch wurde, wie die Photographien zeigen, dreimal wiederholt; speziell das mittlere Bild zeigt eine recht beträchtliche Lichtbogenlänge, aber in sämtlichen drei Fällen war das Ergebnis genau dasselbe.

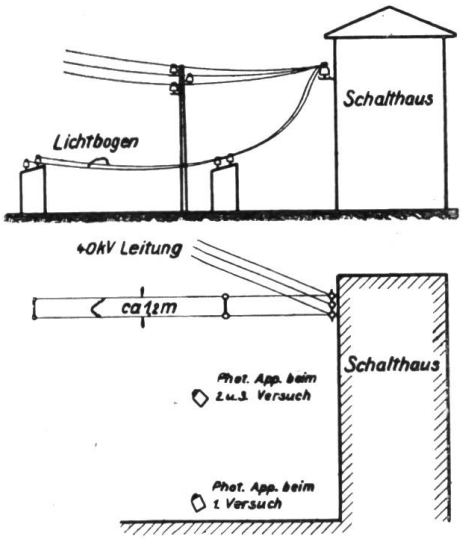

Fig. 19 a.
Anordnung der Lichtbogen-Versuche von Fig. 18.

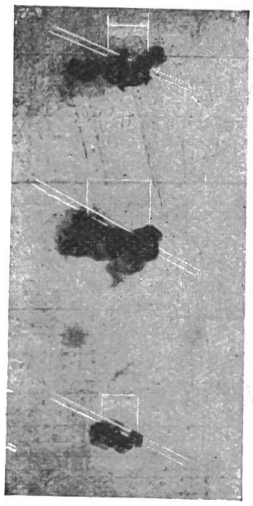

Fig. 19 b.
Photographie des Lichtbogens bei Versuch Fig. 18.

Dass das Impedanzrelais auch bei Doppelerdschluss richtig arbeitet, zeigt folgender im gleichen Netz vorgenommener Versuch. An den beiden in Fig. 20 ein-

gezeichneten Stellen wurde Phase 1, bezw. Phase 2 des Netzes plötzlich an Erde gelegt. Dadurch ist zwischen den beiden Erdschlusstellen ein zweipoliger Kurzschluss hergestellt, der die in die Figur eingetragenen drei Relais zum Ansprechen brachte. Mit dem Ansprechen dieser Relais ist der Fehler aus dem Netz entfernt, ohne dass auch nur eine der versorgten Stationen spannungslos geworden wäre.

Es sei nochmals besonders auf die kurzen Auslösezeiten hingewiesen, die in allen Fällen erzielt wurden.

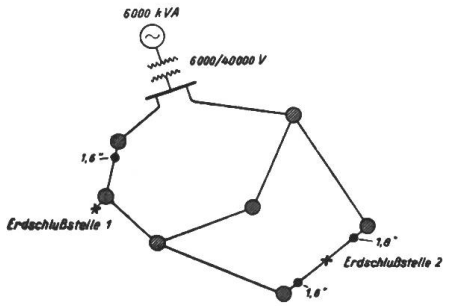

Fig. 20.
Doppelerdschluss in einem 40 kV-Netz.

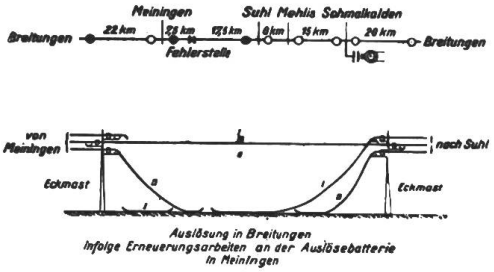

Fig. 21.
Rauhreifstörung in einem 30 kV-Netz.

Zum Schlusse möchte ich noch eine Zahl dem Betriebe entnommener praktischer Erfahrungen mitteilen, die zeigen, dass der Impedanzschutz unter den rauhen Verhältnissen des wirklichen Betriebes durchaus seiner Aufgabe gewachsen ist.

In dem 30 kV-Ringnetz der Fig. 21 riss an der gezeichneten Stelle infolge Rauhreifes ein ganzes Spannfeld. Der Unfall ereignete sich vormittags, zurzeit der grössten Belastung des hauptsächlich Industriegebiete vorsorgenden Netzes. In einer der beiden der Unfallstelle benachbarten Stationen wurde gerade an der Auslösebatterie gearbeitet, so dass der Oelschalter nicht fallen konnte. Für diesen sprang der Schalter der nächstfolgenden Station ein und trotz der dadurch sich ergebenden grossen Entfernung wurde der Fehler so schnell abgeschaltet, dass nicht nur keine der übrigen Stationen spannungslos wurde, sondern dass sogar ein an der bezeichneten Stelle laufender Einankerumformer in Betrieb blieb.

Fig. 22 zeigt ein ausgedehntes 50 kV-Netz. Ein Strang des die beiden Kraftwerke verbindenden Doppelleitungszuges wurde durch einen hereinfallenden Baum beschädigt. Die fehlerhafte Strecke wurde beiderseitig abgeschaltet, ohne dass der Betrieb des Netzes im geringsten gestört worden wäre.

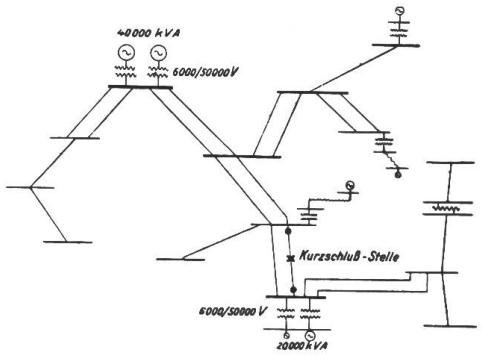

Fig. 22.
Kurzschluss in einem 50 kV-Netz.

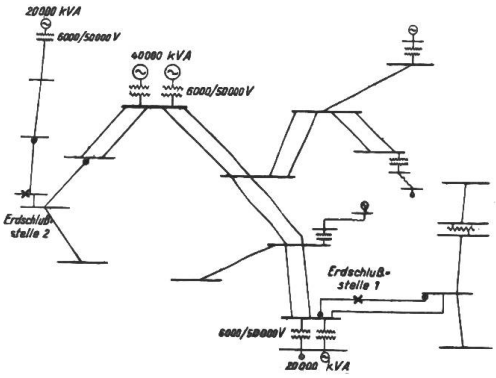

Fig. 23.
Doppelerdschluss in einem 50 kV-Netz.

Ein Doppelerdschluss trat im selben Netz, wie Fig. 23 zeigt, auf dem Strang einer von dem kleineren Kraftwerk ausgehenden Doppelleitung und im Sammelschienenraum einer weit entfernten Station ein. Der fehlerhafte Strang wurde beidseitig abgeschaltet, desgleichen die fehlerhafte Station, auf der sich der Doppel-

erdschluss sofort zum Kurzschluss ausbildete, von sämtlichen Stromlieferungsstellen abgetrennt. Der Fehler war damit mit einer geringstmöglichen Zahl von Schalterauslösungen aus dem Netz entfernt.

Einen weiteren typischen Fall, der eine schwere Störung des Netzes darstellt, zeigt Fig. 24. Bei einem schweren Gewitter traten Ueberschläge in beiden Strängen der von einem kleineren Kraftwerk ausgehenden Doppelleitung auf. Gleichzeitig erfolgte ein Ueberschlag in einer zwischen beiden Kraftwerken liegenden Station. Die Station wurde allseitig abgeschaltet, desgleichen die beiden Doppelleitungsstränge. Der Vorfall beweist, dass auch bei Sammelschienenkurzschlüssen das Impedanzrelais einwandfrei arbeitet.

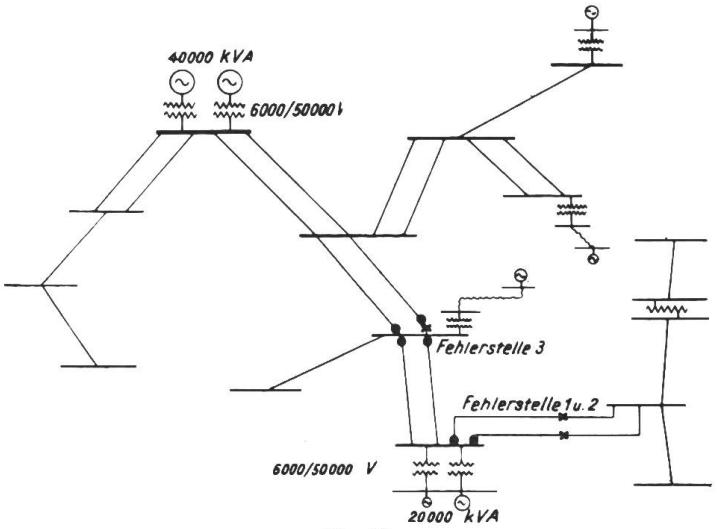

Fig. 24.
Kurzschluss in einem 50 kV-Netz.

Fig. 25 zeigt ein ziemlich kompliziertes 30 kV-Freileitungsnetz. Bei der dargestellten Störung traten an drei verschiedenen Stellen des Netzes gleichzeitig Erd- und Kurzschlüsse auf. Alle drei fehlerhaften Strecken wurden abgeschaltet, ohne dass auch nur eine Station spannungslos geworden wäre.

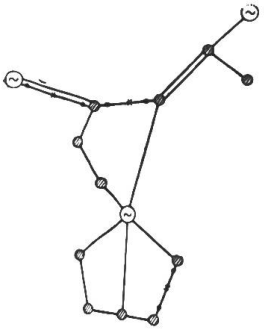
Fig. 25.
Dreifach-Erdschluss in einem 30 kV-Netz.

Die zum Schlusse noch gebrachten Fälle beziehen sich auf ein 100 kV-Netz mit grosser Leistungskonzentration und beweisen, dass der Impedanzschutz auch unter derartigen Verhältnissen einwandfrei arbeitet. Bei einem Kurzschluss auf einem Strang, der die zwei Kraftwerke der Fig. 26 verbindenden Doppelleitung wurde dieser Strang beidseitig abgeschaltet, ohne den Betrieb der Kraftübertragung irgendwie zu beeinträchtigen.

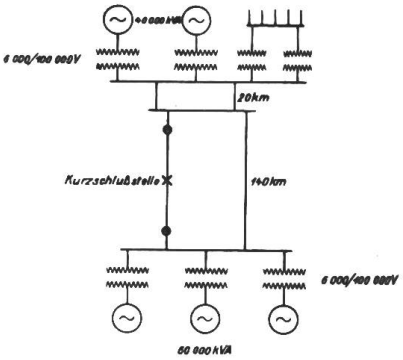

Fig. 26.
Kurzschluss in einem 100 kV-Netz.

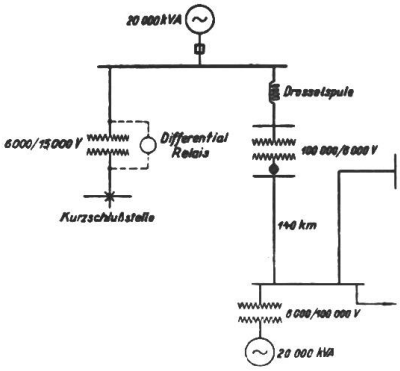

Fig. 27.
Kurzschluss in einem Sekundär-Netz.

In Fig. 27 trat an den 15 kV-Sammelschienen des einen Kraftwerkes ein dreipoliger Kurzschluss auf. Da die Transformatoren der Zentrale nur Differentialschutz und keinen Ueberstromschutz besassen, löste das dem Kraftwerk zunächst gelegene Distanzrelais der Fernkraftübertragung aus. Trotz der verhältnismässig hohen Impedanz der zwei in Reihe geschalteten Transformatoren war die Auslösezeit nicht so lang, dass der Betrieb des übrigen Netzes gestört worden wäre. Der Vorfall zeigt wiederum den Vorteil des Impedanzschutzes, der darin besteht, dass beim Versagen irgend eines Auslösegliedes immer das nächste weiter rückwärts gelegene Relais einspringt und so dafür sorgt, dass unter allen Umständen der Fehler aus dem Netz entfernt wird.

Die vorstehend gebrachte Auswahl aus zahlreichen Betriebserfahrungen zeigt, dass der Impedanzschutz an sich die ihm gestellte Aufgabe erfüllt. Diese Aufgabe besteht in der schnellsten Abschaltung des fehlerhaft gewordenen Netzteiles bei Aufrechterhaltung des Betriebes des übrigen Netzes. Als ausserordentlich störend hatte es sich jedoch in manchen Netzen erwiesen, dass bei richtig abgeschalteten Kurzschlüssen im Hochspannungsnetz doch häufig Abschaltungen von Einankerumformern auftraten, die an sich unnötig wären. Es ist dies ein Mangel, den man nicht dem Selektivschutz zur Last legen kann, er ist aber auch nicht, wie vielfach angenommen wird, im Verhalten der Einankerumformer selbst begründet. Vielmehr hat sich gezeigt, dass für die beobachteten Fehlabschaltungen die an den Umformern angebrachten Schutzeinrichtungen verantwortlich sind. Und zwar handelt es sich hier in erster Linie um die auf der Drehstromseite angeschlossenen Nullspannungsrelais, die an sich zwar erforderlich sind, um das Wiedereinschalten des Netzes auf nicht synchronisierte Umformer zu verhüten, die jedoch allgemein mit für diesen Zweck völlig unnötiger Empfindlichkeit ausgeführt werden. Gleichstromseitig erfolgt die unnötige Abschaltung der Umformer durch die sehr empfindlich eingestellte unverzögerte Rückstromauslösung der Gleichstromautomaten.

Die letztere Schutzeinrichtung kann im allgemeinen ohne Nachteil für den Umformer weggelassen werden. Die Nullspannungsauslösung lässt sich ganz wesentlich verbessern, wenn man berücksichtigt, dass ein Einankerumformer bei den hier in Betracht kommenden Zeiten von 2–4 Sekunden nur bei dreipoligen Kurzschlüssen ausser Tritt fallen kann und auch dann nur, wenn die drehstromseitige Netzspannung auf sehr kleine Werte fällt, die unter 20 % der normalen Spannung liegen. Man verwendet sonach für den Schutz von Einankerumformern zweckmässig zwei Nullspannungsrelais, die an zwei verschiedenen verketteten Spannungen liegen und deren die Auslösung des Umformers bewirkenden Arbeitskontakte hintereinander geschaltet sind. Die Relais sollen erst dann ansprechen, wenn die Netzspannung unter 20 % ihres normalen Wertes sinkt. Der beschriebene Nullspannungsschutz löst sonach nur bei dreipoligen Kurzschlüssen mit mindestens 80 % Spannungsrückgang aus.

Mit einem in der oben angegebenen Weise geschützten Einankerumformer von 350 kW, der parallel mit einer Akkumulatorenbatterie auf das Gleichstromnetz einer grösseren Stadt arbeitete, wurden Kurzschlussversuche zur Erprobung des neuen Schutzes gemacht. Der Umformer, der selbstverständlich auf beiden Seiten den üblichen Maximalschutz besass, war an das in Fig. 28 dargestellte 30 kV-Freileitungsnetz an der bezeichneten Stelle angeschlossen. Der Figur ist die Art und Zahl der eingeleiteten Kurzschlüsse zu entnehmen. Bei keinem der Kurzschlüsse, die durch die zugehörigen Impedanzrelais wieder abgeschaltet wurden, trat eine Abtrennung des Umformers vom Netz ein; dabei ist zu berücksichtigen, dass schon bei dem weitest entfernten Kurzschluss 2 die Kraftwerkspannung auf annähernd die Hälfte ihres normalen Wertes sank. Die Tatsache, dass in über $^1/_2$jährigem Betrieb trotz zahlreicher Netzkurzschlüsse keine Abschaltung des Umformers mehr erfolgte, beweist, dass die Versuche die in Wirklichkeit gegebenen Verhältnisse vollkommen decken.

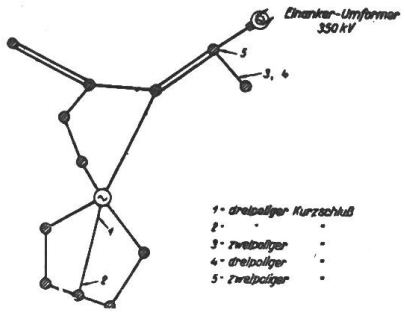

Fig. 28.
Schema der Einankerumformer-Versuche.

Die entwickelten Gesichtspunkte sind selbstverständlich auch beim Nullspannungsschutz von Asynchronmotoren zu berücksichtigen.

Es ist bekannt, dass Kopfstationen besonders unter Ueberspannungen zu leiden haben, weil ankommende Ueberspannungswellen in ihnen unter Verdoppelung der Spannung reflektiert werden. Sobald aber die Ringe geschlossen werden, was ein richtig arbeitender Selektivschutz erst ermöglicht, verschwinden die erwähnten Reflexionspunkte und die Ueberspannungswellen können sich, ohne Schaden anzurichten, totlaufen. Ein gut arbeitender Selektivschutz erhöht also auch die Ueberspannungssicherheit eines Netzes.