

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 39 (1948)
Heft: 10

Rubrik: CIGRE : Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension : 11. Session, Paris 1946 [Fortsetzung und Schluss]

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: 13.01.2026

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

schinen für 15 000 V Betriebsspannung haben nur eine Isolationsdicke von 4 mm, gegenüber 7,5 mm bei den ersten 13 000-V-Maschinen; dies bedeutet gewiss einen ganz wesentlichen Fortschritt auf dem Gebiete der Maschinenisolierung. Durch folgenden Vergleich lässt sich der Fortschritt ebenfalls sehr schön erkennen.

1927 kam ein Turbo-Generator für eine Leistung von 40 000 kVA zur Ablieferung. Sein Gewicht war 106 t. 17 Jahre später wurde vom Kunden eine zweite Maschine für 50 000 kVA bestellt. Diese Maschine hatte nicht mehr 106 t, sondern nur noch 72 t Gewicht. Bei einer Leistungssteigerung um 25 % konnte also das Gewicht um 32 % vermindert werden. Fig. 13 zeigt den neuen Turbo-Generator auf dem Versuchsstand. Solche Maschinen kommen, wie nebenbei erwähnt werden soll, nun auch in der Schweiz zur Aufstellung. Sie sollen hauptsächlich in der wasserarmen Zeit, als sogenanntes Winter-Kraftwerk, eingesetzt werden (Gasturbinen-Kraftwerk Beznau der NOK).

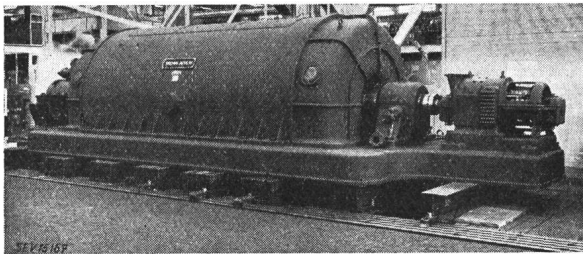


Fig. 13
Turbogenerator
von 50 000 kVA Leistung und 10 000 V Betriebsspannung,
30000 U./min

Neben der erwähnten Leistungssteigerung und Gewichtsverminderung haben, was speziell der Betriebsmann zu schätzen weiss, die Maschinen einen hohen Grad von Betriebssicherheit erreicht. Dazu je ein Beispiel für einen Turbo-Generator und für eine langsam laufende Maschine:

Eine 40 000-kVA-Turbo-Gruppe für 10 000 V Betriebsspannung hat im Zeitraum von 15 Jahren 2,52 Milliarden kWh bei einem Leistungsfaktor von 0,65 geliefert. Die Gruppe lief während 110 000

Stunden, was einem Benützungsfaktor von 84 % entspricht. Die mittlere Leistungsabgabe betrug 35 000 kVA, entsprechend 88 % der Vollastleistung. Während der ganzen 15 Jahre wurde die Maschine nie geöffnet. Bei der Revision hielt die Wicklung noch der normalen Prüfspannung von 23 kV stand. Irgendwelche Bedingungen ausserhalb den Vorschriften des SEV waren seinerzeit bei der Bestellung nicht gemacht worden.

Das zweite Beispiel: Ein schweizerisches Kraftwerk reichte bei einer gründlichen Maschinenrevision mehr als 20 Spulen eines 8000-V-Generators zur Überprüfung des Isolationszustandes ein. Laut Statistik des Werkes waren die Spulen während 28 Jahren bei einem Benützungsfaktor von 87 % anstandslos im Betrieb gewesen. Die Spulen entsprachen z. B., wie durch eine Verlustmessung eindeutig festgestellt werden konnte, keinesfalls den erwähnten, hie und da gestellten scharfen Bedingungen. Sie haben ihnen natürlich auch im neuen Zustand, also vor 28 Jahren, nicht entsprochen. Und trotzdem sind diese Spulen ohne neue Isolierung wieder eingebaut worden, ein beredtes Zeugnis für ihre gute Qualität und die dargelegte Auffassung.

Ich habe Ihnen durch diese Beispiele von der Güte und dem hohen Grad von Betriebssicherheit gesprochen. Sie werden sich unwillkürlich fragen, wie es sich mit Störungen an solch grossen Maschinen verhält. Darüber möchte ich Ihnen am Schluss meines Vortrages eine Angabe machen.

Die Statistik, aus welcher die Störungsfälle ausgezogen wurden, umfasst über 5000 Turboläufer und langsam laufende Generatoren, die in den Fabriken in Baden hergestellt worden sind.

Die totale installierte Leistung dieser Generatoren beträgt mehr als 15 000 000 kVA. Das ist das rund 6fache der in der Schweiz installierten Maschinenleistung. Von diesen gelieferten Generatoren haben weniger als 5,5 % zu Störungen Anlass gegeben, die zu einer längeren Ausserbetriebsetzung der Maschinen führten.

Adresse des Autors:

F. Beldi, Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie.,
Baden (AG).

CIGRE

Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension

11. Session, Paris 1946

[Schluss von Bd. 39(1948), Nr. 9, S. 313]

061.3 : 621.3

Gruppe 35:

Überspannungen, Blitzschläge und Blitzableiter

621.317.755

A. Registrierung elektrischer ultraschneller Vorgänge mit einem Kathodenstrahloszillographen in geschlossenem Glaskolben. Referat von W. Nethercot u. E. L. White. Das Referat, Nr. 126 (Grossbritannien), umfasst 13 Seiten Text mit 7 Figuren im Text.

Die elektrischen Vorgänge von weniger als 200 μ s Dauer sind bis jetzt mit Kathodenstrahloszillographen mit eingebauter Photographiervorrichtung untersucht worden, wobei das Vakuum ständig durch Pumpen aufrechterhalten wurde. Mit Rücksicht auf den Platzbedarf dieser Geräte und die

Nachteile der Verwendung von Vakuumpumpen wurde versucht, Oszillographen mit zugeschmolzenem Glaskolben zu bauen. Diese Oszillographen arbeiten mit Beschleunigungsspannungen von 5...10 kV, was Registriergeschwindigkeiten von rund 10 000 km/s entspricht. Diese Röhren eignen sich also zur Registrierung der meisten ultraschnellen Vorgänge, denen man in der Technik der hohen Spannungen begegnet.

Im Referat werden die Eigenschaften der Registrierkameroobjektive der Oszillographen mit luftdicht zugeschmolzenem Glaskolben angegeben, die für Aufnahmen mit sehr hohen Geschwindigkeiten vorgesehen sind. Anschliessend werden die Ergebnisse behandelt, die mit einem solchen Gerät bei den von der *Electrical Research Association* ausge-

fürten Untersuchungen erreicht wurden. Es handelt sich namentlich um die Registrierung der sehr raschen Vorgänge, z. B. Zündung der Funkenstrecken bei Stoßspannungen, Einfluss von Widerständen zur Dämpfung harmonischer Schwingungen bei kapazitiven Entladungen, Bestimmung der Überschlagsstellen in den Transformatorwicklungen bei Stossversuchen, Abschaltcharakteristik von Leistungsschaltern, Messung der Spitzenspannungen in den Zündvorrichtungen der Verbrennungsmotoren usw.

621.315.1.048.1 : 621.316.93

B. Dimensionierung der Isolation der Hochspannungsfreileitungen gegen Überspannung durch direkte Blitzeinschläge. Referat von M. Strauven. Das Referat, Nr. 205 (Belgien), umfasst 25 Seiten Text mit 14 Figuren und 2 Tabellen im Text.

Es wird der Fall direkter Blitzeinschläge in Fernleitungen betrachtet, die mit geerdeten Schutzdrähten versehen sind.

Zwischen der Spannung U des vom Blitz getroffenen Schutzdrahtes und dem Blitzschlagpotential V besteht die Beziehung $U = rV$, wo r ein Faktor kleiner als 1 ist, der von den Impedanzen des Erdungsstromkreises abhängt. Bezeichnet man ferner mit K den elektrostatischen Kopplungskoeffizienten zwischen dem Schutzdraht und den Polleitern, mit d den Abstand zwischen diesen, mit l die Länge der Isolatorenketten und mit u die durch die Überschlagspannung ausgedrückte Durchschlagfestigkeit der Luft, so gilt zwischen diesen Faktoren die Beziehung

$$rV(1 - K) = u d = u l$$

Aus dieser Gleichung lassen sich ableiten: 1. der Wert des minimalen Blitzpotentials V , das auf einer gegebenen Strecke d oder l den Überschlag einzuleiten vermag; 2. der Mindestabstand d oder l , bei dem die Leitung für jeden Blitzschlag mit einem Potential kleiner als V nicht gestört werden kann.

Bei einer geplanten Leitung kann man nach dieser Gleichung die Isolationslängen vorausbestimmen, die erforderlich sind, um einen gewünschten Störsicherheitsgrad zu erhalten.

Die Berechnung der Spannung U , die ein Leiter annimmt, der vom Blitz getroffen wurde, lässt sich nach zwei Methoden durchführen. Nach der ersten Methode werden die Schutzdrähte, die Masten und die Erdelektroden durch eine auf ihrer ganzen Länge verteilte Impedanz und durch eine ebenso verteilte Kapazität gegen Erde (in Nebenschluss) ersetzt. Nach der zweiten Methode werden die Schutzdrähte durch einzelne untereinander gleich grosse Impedanzen dargestellt; die Erdelektroden werden durch induktionsfreie konzentrierte Widerstände ersetzt, die normalerweise gleich dem Erdungswiderstand der Masten sind. Diese zweite, einfachere Methode wird im vorliegenden Referat angewendet.

Da das Blitzpotential V bis jetzt nicht gemessen werden konnte, berechnet man seine Grössenordnung, indem man die mit den bekannten Verfahren registrierte Entladungstromstärke mit einem Faktor multipliziert, der von der Impedanz der von der Entladung durchflossenen Geräte abhängt.

Der Kopplungskoeffizient K ist für Luft gleich den Koeffizienten der elektrostatischen und der elektromagnetischen Kopplung. Er wird nach der Formel berechnet:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{d}{D}\right)}{\ln\left(\frac{2h}{\varrho}\right)}$$

wo D der Durchmesser der Leiter, d ihr Abstand, h die Höhe des Schutzdrahtes über dem Boden und ϱ der Radius dieses Drahtes ist.

Sobald die vom Blitzschlag herrührende Spannung einen kritischen Wert überschreitet und ein Koronaeffekt einsetzt, ändert sich der Wert von K . Die elektromagnetische Kopplung bleibt unbeeinträchtigt; man muss aber an Stelle des Radius ϱ des Schutzdrahtes den Radius ϱ_K in die Rechnung setzen, der den durch den Koronaeffekt entstehenden halbleitenden Mantel berücksichtigt, der den Schutzdraht umgibt.

$$K = K_0 \sqrt{m}$$

wo K_0 die elektrostatische Kopplung, und m ein Faktor ist, der durch die Formel gegeben ist:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{2h}{\varrho}\right)}{\ln\left(\frac{2h}{\varrho_K}\right)}$$

In Anbetracht der einflussreichen Rolle des Koronaeffektes und des heutigen Standes der Messtechnik, empfiehlt der Verfasser, die beschriebene Berechnungsmethode vorläufig auf diejenigen Fälle zu beschränken, wo die Steilheit der Stoßspannung 5000...6000 kV/ μ s und die maximale Amplitude 16 000 kV nicht überschreiten.

Tabelle I gibt einige Werte der bei diesen maximalen Beanspruchungen entstehenden Überspannungen U , der erforderlichen Länge l der Isolatorkette damit kein Überschlag erfolgt und des Radius ϱ_K der entstehenden Koronaerscheinung an. Es wurden dabei Fälle verschiedener Erdungswiderstände R und zweier Abstände d zwischen dem vom Blitz getroffenen Schutzdraht und dem Polleiter berücksichtigt. Die Polleiter waren in einer Höhe von 20...30 m über dem

Tabelle I

	Abstand zwischen Schutzdraht und Leiter							
	$d = 3 \text{ m}$				$d = 6 \text{ m}$			
Erdungswiderstand R (Ω)	25	50	75	100	25	50	75	100
Überspannung U des Schutzdrahtes (kV)	1100	1820	2300	2650	1100	1820	2300	2650
Länge l der Isolatorkette (m)	0,98	1,56	1,92	2,15	1,17	1,88	2,35	2,65
Radius ϱ_K des Koronagebietes (m)	0,12	0,28	0,43	0,52	0,12	0,28	0,43	0,52

Boden verlegt. Die Durchschlagfestigkeit der Luft betrug 730 kV/m.

621.316.995

C. Das Verhalten der Erdelektroden bei Stoßströmen grosser Stärke. Referat von K. Berger. Das Referat, Nr. 215 (Schweiz), umfasst 32 Seiten Text mit 32 Figuren und 4 Tabellen im Text.

Der Zweck der Versuche, über die in diesem Referat berichtet wird, war namentlich die Untersuchung, ob der Widerstand einer Erdelektrode, d. h. das Verhältnis u/i (Momentanwerte von Spannung und Strom), unter Stoßspannungen oder Stoßströmen grosser Stärke derselbe ist, wie er mit üblichen Erdungs-Messinstrumenten gemessen wird.

Bei den Versuchen, die in der Versuchstation Goesgen der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) vorgenommen wurden, fand die nachstehend beschriebene Einrichtung Verwendung.

Ein halbkugelförmiges Becken von 2,50 m Durchmesser, aus Tonziegeln hergestellt und mit einem als Elektrode dienenden Metallgitter ausgekleidet, war mit der zu untersuchenden Erde gefüllt, in welche konzentrisch eine verchromte Metallkugel von 250 oder 500 mm Durchmesser gesetzt wurde, die über einen zur Strommessung benützten Nebenschluss an den einen Pol eines Stoßspannungsgenerators geschaltet war. Der andere Pol des Generators war durch die Gitterelektrode geerdet. Zwei Oszillographen dienten zur Strom- und Spannungsmessung. Die Spannung des Generators betrug einstufig 200 kV ($C = 1 \mu\text{F}$) und vierstufig 800 kV ($C = 1/16 \mu\text{F}$).

Die Versuchsergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Bei mit Wasser gefülltem Becken stellt man fest, dass sich das Wasser bis zu den höchsten möglichen Spannungen normal verhält. Von 150 kV an treten jedoch Überschläge an der Oberfläche des Wassers auf. Der Widerstand unter der Wirkung der Spannungstöße entspricht dem mit den üblichen Methoden mit Niederfrequenz bestimmten Wert.

2. Wenn die Stromdichte an der Erdelektrode keinen höheren Potentialgradienten als 2,5...3 kV/cm erzeugt, lässt sich das Verhalten räumlich kleiner Erdelektroden (Rohre, Platten, kurze Bänder, usw.) bei Stoss durch eine Messung des Erdungswiderstandes mit den üblichen Methoden bestimmen.

3. Sowie der Wert des Gradienten höher ist als 3 kV/cm, nimmt das Verhältnis zwischen Spannung und Strom an der

Erdelektrode ab, und die Erde verhält sich dann wie ein nichtlinearer Widerstand. Es bilden sich ausserdem Hysteresiskurven, die umso weiter geöffnet sind, je stärker der Strom ist und je länger er dauert.

4. Für räumlich ausgedehnte Erdelektroden (Drähte oder Bänder von mehr als 30 m Länge) zeigt sich in der Stirn des Stromstosses eine Spannungserhöhung, so dass der bei Stoss beobachtete Erdungswiderstand den mit Niederfrequenz gemessenen Wert überschreitet. Diese Tatsache rührt vom induktiven Spannungsabfall längs der Erdungselektrode her. In diesem Fall treten gleichfalls Hysteresisschleifen auf, die aber durch die Induktivität verursacht sind.

5. Das gleiche scheinbare Wachsen des Erdungswiderstandes bei Stoss wird auch dann beobachtet, sobald dieser Widerstand bei Stoss nicht unmittelbar an der Elektrode, sondern an einer Stelle der vom Stossgenerator kommenden Zuleitung gemessen wird. Einige Beispiele mit induktivem Spannungsabfall in solchen Zuführungsleitern oder in Metallmasten werden vom Verfasser angegeben.

621.316.93(471.1)

D. Der Überspannungsschutz in Finnland. Referat von E. K. Saraoja. Das Referat, Nr. 302 (Finnland), umfasst 2 Seiten Text mit 1 Tabelle im Text.

Eine 1945 unternommene Rundfrage bei den 323 finnlandischen Elektrizitätsgesellschaften, von denen 59 (oder 18 %) moderne Schutzvorrichtungen auf Netzen von 3...120 kV verwenden, zeigte, dass die Überspannungsableiter und Kondensatoren allgemein einen befriedigenden Schutz gewährt haben. Doch beträgt der jährliche Prozentsatz an zerstörten Geräten 3,2 für die Überspannungsableiter und 3,5 für die Kondensatoren, was darauf zurückzuführen ist, dass die meisten Leitungen auf nicht geschützten Holzmasten montiert sind. Die mit Stahlstäben oder Zählern gemessenen Stoßströme, im allgemeinen unter 250 A, erreichen selten einige tausend A. In manchen Fällen traten trotz der Überspannungsableiter Überschläge auf, was auf einen Fehler in der Isolationskoordination hindeuten scheint.

551.594.2 : 621.315.1

E. Die Wirkungen des Blitzeinschlags auf Fernleitungen. Referat von W. W. Lewis. Das Referat, Nr. 313 (USA), umfasst 14 Seiten Text mit 4 Figuren im Text.

Der Verfasser teilt die Ergebnisse einer Untersuchung mit, die bis 1943 fortgeführt wurde und die Wirkungen des Blitzeinschlags auf die Hochspannungsfernleitungen betrifft.

Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

1. Der Gesamtstrom des Blitzes und die Blitzströme in den Gittermasten.
2. Die Blitzströme in den Schutz- und den Leitungsdrähten der Hochspannungsleitung.
3. Die Ströme in den Überspannungsableitern.
4. Die Überspannungen in den Kraftwerken.
5. Die Amplituden der vom Blitzschlag oder von der Betätigung der Leistungsschalter verursachten Ausgleichswellen.
6. Der Widerstand der Gittermasten gegen die Überspannungswellen.
7. Die Blitzströme in grossen Höhenlagen.

Die Messungen der Blitzströme in den Gittermasten wurden an Leitungen ausgeführt, deren Spannungen zwischen 66...220 kV betrugen. Hiezu wurden magnetische Ringe benutzt, die nahe an den Hauptholmen der Gittermasten montiert waren. Der erhaltene Höchstwert pro Mast betrug 100 kA. Der Gesamtblitzstrom, die Summe der Ströme aller vom Blitz getroffenen Gittermasten, ergab maximal 200 kA.

Auf den mit Schutzdrähten versehenen 132-kV-Leitungen der Appalachian Electric Power Co. wurden an den Stellen, wo die Leitungen in den Kraftwerken endeten, Ströme von 36 kA in den Schutzdrähten und bis 11,5 kA in den Polleitern registriert.

In den gegen direkte Blitzeinschläge geschützten Kraftwerken, welche gleichfalls geschützte Hochspannungsnetze speisen, wurden mit magnetischen Ringen in den Erdungsleitern der Überspannungsableiter Ströme bis zu 4 kA gemessen. In Kraftwerken, welche nichtgeschützte Niederspannungsleitungen versorgen, erreichten die registrierten Blitzschlagströme 15 kA. In Niederspannungsverteilnetzen mit Leitungen ohne Schutzdrähte und mit längs der Leitungen verteilten Überspannungsableitern, wurden in den Erdungsleitungen dieser Überspannungsableiter Ströme bis über 25 kA gemessen.

Von 1940 bis einschliesslich 1943 wurden mit den Registriergeräten dreier Kraftwerke des 132-kV-Netzes der Appalachian Power Co. insgesamt 429 Überspannungen gemessen. Die höchste registrierte Spannung war 525 kV, und 50 % aller Überspannungen erreichten mindestens 145 kV.

Alle gemessenen Spannungen waren niedriger als die Zündspannung der Funkenstrecken der Überspannungsableiter.

Die auftretenden Spannungsspitzen der Ausgleichswellen wurden mit einem Steilheitsanzeiger bestimmt, der aus einem Koppelkondensator bestand, welcher zwischen die Leiter und Erde geschaltet und mit magnetischen Vorrichtungen kombiniert war, die den Spitzenwert des durch den Kondensator fliessenden Stroms registrierten. Die erhaltenen Werte betrugen 810 kV in den Kraftwerken der 132-kV-Netze und 208 kV in denjenigen der 33-kV-Netze.

Auf dem 140-kV-Netz der Consumers' Power Co. wurden Messungen des Widerstandes der Füsse der Gittermasten gegen Überspannungswellen vorgenommen. Hiezu wurde die Spannung zwischen einem Mastenholm und einer Erdelektrode in 1,50 m Tiefe gemessen, die 1,80 m vom Gittermast weg angeordnet war. Zugleich wurde der Blitzstrom im Gittermast gemessen. Kennt man den mit dem Ohmmeter bestimmten Widerstand des Fusses des Gittermasts, so lässt sich der Wert des wahren Potentials leicht berechnen. Dieser Wert, dividiert durch den Blitzstrom, ergibt den Widerstand, den der Gittermast den Überspannungswellen entgegensetzt.

Das Verhältnis zwischen dem Überspannungswiderstand und dem normalen ohmschen Widerstand scheint mit der Zunahme des Widerstandes des Mastenfusses und mit der Zunahme des hindurchfliessenden Stroms abzunehmen. Bei sandigem Boden, dessen Widerstand hoch ist, und bei grossen Überspannungen war dieses Verhältnis 0,04.

Die Stärke des Blitzstroms scheint in 40° nördlicher Breite mit zunehmender Höhe ü. M. abzunehmen. Die Beobachtungen deuten an, dass in einer Höhe von etwa 5500 m ü. M. der Strom auf Null sinken würde. Es besteht anscheinend ein gewisses Verhältnis zwischen Temperatur und Höhe ü. M. einerseits und dem Vorhandensein oder Fehlen von Blitzschlägen andererseits. Nach den bis jetzt gemachten Beobachtungen treten Blitzschläge bei einer Temperatur von 0°C nicht mehr auf.

551.594.2

F. Schweizerische Blitzforschungen. Am Monte San Salvatore bei Lugano ausgeführte Messungen. Referat von K. Berger. Das Referat, Nr. 318 (Schweiz), umfasst 18 Seiten Text mit 15 Figuren im Text.

Während der letzten zehn Jahre vor dem zweiten Weltkrieg wurde in der Schweiz durch ausgedehnte oszillographische Messungen festgestellt, dass die Hauptursachen der Störungen auf den Freileitungen der elektrischen Energieübertragung direkte Blitzeinschläge sind. Die Forschungen, über die im vorliegenden Referat berichtet wird, wurden von 1942 an von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) ausgeführt, mit dem Zweck, diese Störungen grundsätzlich zu untersuchen. Hiezu wurde auf dem Monte San Salvatore bei Lugano, dessen Gipfel in 915 m ü. M. liegt (641 m über dem Spiegel des Sees von Lugano), ein Blitzableiterturm gebaut.

Der 60 m hohe Holzturm wird von einer Spitze aus Eisenrohr von 10 m Länge überragt. Er ist durch Stahlseile gespannt. In jedes derselben ist ein Holzbalken eingefügt, der durch eine Funkenstrecke geschützt wird, die auf 3 m Überslagabstand eingestellt ist. Der Blitzableiterturm ist über einen Shunt an eine Messeinrichtung angeschlossen, die in einem Faradayschen Käfig untergebracht ist. Der Käfig, der zum Schutz des Beobachters bestimmt ist, kann bei einem Blitzschlag infolge der Induktionswirkung der Erdleitung eine Spannung von über 100 kV gegen Erde erreichen.

Die Messeinrichtung umfasst zwei Oszillographenschleifen, welche den gesamten zeitlichen Verlauf der Blitzströme messen und 4 weitere Oszillographenschleifen für die Messung des Spitzenwerts und der Stossladung des Blitzstroms. Diese Messungen geschehen durch Aufladung von Kondensatoren über Glühkathodenröhren.

Im einen Fall ist die Aufladespannung des Kondensators proportional dem Spitzenwert des Blitzstroms, im andern Fall proportional der Stossladung desselben. Diese Kondensatoren entladen sich über Widerstände in die Meßschleifen des Oszillographen, so dass das Tempo des Vorgangs genügend verlangsamt wird, und die Schleifen trotz ihrer mechanischen Trägheit die betreffende Grösse richtig anzeigen können.

Um beim Auftreten des Blitzschlags jede Verzögerung im Funktionieren des Schleifenoszillographen zu vermeiden, bleibt der Kameraverschluss über dem sich drehenden Film offen, und der Blitzschlag schaltet selbst die Lichtquelle des Oszillographen ein. Diese Lichtquelle besteht aus einer Bogenlampe mit Wolframelektroden. Der Lichtbogen wird durch eine Überspannung gezündet, die von einem kleinen 12-kV-Stossgenerator erzeugt und vom Blitzstrom eingeschaltet wird. Vorkkehrungen sind getroffen, dass man schon während der ersten Tausendstelsekunde sehr helles Licht erhält und infolgedessen auch der erste Teil der Blitzentladung registriert wird, der im allgemeinen der wichtigste ist.

Die Konstruktion des Nebenzwiderstandes für die Messung des Blitzstroms führte zur Lösung mehrerer heikler Probleme, denn die Schwankungen des Blitzstroms sind ausserordentlich rasch und können 10 kA/s erreichen. Entgegen der Anordnung, die am Empire State Building in New York benützt wird, wurde am Monte San Salvatore zunächst ein dreistufiger Nebenschluss aus kalibrierten metallischen Widerständen vorgesehen. Die Messwiderstände der drei Stufen sind 0,02, 0,5 und 10 Ω ; sie bestehen aus Röhren mit sehr geringer Induktivität. Die beiden ersten Stufen müssen gegen Überlastung geschützt werden, was durch Benützung veränderlicher Widerstände analog den im Bau der Überspannungsableiter verwendeten erreicht wird. Wegen der hohen Stromdichten und der langen Dauer der Ströme verursachen jedoch diese Widerstände aus keramischer Masse bedeutende Hysteresisschleifen, so dass sie allein für direkte Messungen zu wenig genau wären.

Die Messeinrichtung ist durch Stahlstäbchen für die Messung des Spitzenwerts des Blitzstroms, wie sie seit mehreren Jahren an Hochspannungsleitungsmasten benützt werden, sowie durch Induktionsschleifen zur Messung der maximalen Steilheit des Blitzstroms vervollständigt. Zum gleichen Zweck sind unmittelbar über der Registriertrommel, die den photographischen Film trägt, zwei Klydonographenspitzen angeordnet. Diese Spitzen messen mit verschiedener Empfindlichkeit den Spannungsabfall in einer eisenfreien Induktionsspule von ungefähr 12 μ H, die vom Blitzstrom durchflossen wird und mit dem Nebenschluss in Serie liegt.

Die oben beschriebene Anordnung wurde im Juni 1943 in Dienst gestellt. Im folgenden Jahr wurde sie durch einen ersten Kathodenstrahloszillographen, dann im Frühjahr 1945 durch einen zweiten ergänzt.

Während der drei Jahre 1943...1945 wurden auf dem Blitzableiterturm jährlich 7...10 Blitzschläge beobachtet.

Die Übereinstimmung zwischen den oszillographischen Strommessungen und den Werten, die mit der durch den Blitzstrom magnetisierten Stahlstäbchen gemessen wurden, ist in zahlreichen Fällen sehr zufriedenstellend. Es ist wichtig, dass das Stäbchen seine Magnetisierung nur durch einen einzigen Stoßstrom erhält; im andern Fall ist die Messung mit diesen Stäbchen ungenau.

Die Ergebnisse, die während dreier Gewitterperioden mit ungefähr 30 direkten Blitzschlägen erhalten wurden, lassen bereits die grosse Verschiedenheit der Blitzströme in Form, Grösse, Dauer und Ladung erkennen. Abgesehen von den extremen Fällen von Stoßströmen kurzer Dauer von 10...30 kA und schwacher Ströme von weniger als 1 kA von einigen Hundertstel- bis Zehntelsekunden Dauer wurden auch Ströme von einigen kA und einer Dauer beobachtet, welche kaum 0,01 s erreichte. Diese drei Formen können überlagert sein. Die Steilheit der Stoßströme der Blitze ist beträchtlich; die Frontdauer ist sehr oft kleiner als 3 μ s. Die Halbwertdauer der Stoßströme von mehr als 5000 A ist nach den gemachten Beobachtungen im allgemeinen 50...130 μ s; die Messungen sind aber diesbezüglich noch zu wenig zahlreich, um allgemeine Schlüsse daraus ziehen zu können.

621.317.333.8 : 621.314.21

G. Spannungsverteilung in den Wicklungen der Transformatoren bei Stossversuchen. Übertragung der Überspannungen auf benachbarte Wicklungen. Referat von F. Descans u. H. Chevalier. Das Referat, Nr. 322 (Belgien), umfasst 19 Seiten Text mit 3 Figuren im Text.

Das Referat besteht aus drei Teilen, von denen der erste die theoretischen Prinzipien behandelt, die für die Untersuchung der Verteilung der Stoßüberspannungen in den Wicklungen der Transformatoren nötig sind.

Die bei einem idealen Transformator zwischen zwei aufeinanderfolgenden Windungen übertragene Spannung lässt sich durch den Ausdruck

$$U \sqrt{\frac{C_1}{C_1'}}$$

darstellen, in welchem U die Spannung der einfallenden Welle, C_1 die Kapazität der ersten Windung gegen Masse, und C_1' die Kapazität zwischen den beiden Windungen bedeuten.

Im zweiten Teil wird die Spannung gegen Erde berechnet, die der als isoliert vorausgesetzte Sternpunkt des Transformators annimmt, wenn eine Wicklung einer Stoßspannung ausgesetzt wird. Weil diese Spannung einen sehr hohen Wert erreichen kann, ist ein Überschlag zwischen Sternpunkt und Erde möglich. Es scheint also nötig zu sein, die Isolation zu verstärken. Da aber diese Lösung wenig wirtschaftlich ist, bildet die Erdung des Sternpunkts im vorliegenden Fall die beste Lösung.

Im dritten Teil des Referats wird die Übertragung der Überspannungen von einer der Stoßspannung unterworfenen Wicklung auf die Nachbarwicklungen untersucht. Es müssen dabei die Fälle der elektrostatischen Kopplung und diejenigen der magnetischen Kopplung unterschieden werden.

1. Elektrostatische Kopplung. Wenn die Stoßspannung die Hochspannungswicklung eines Transformators trifft, so ist die durch Kapazitätswirkung auf die Niederspannungswicklung übertragene Überspannung vernachlässigbar, sobald Verbraucher angeschlossen sind, die eine Wirkleistung von 5...10 % der Transformatorleistung aufnehmen. Die übertragene Überspannung kann gefährlich sein, wenn die Sekundärwicklung offen ist.

Wenn die Stoßspannung der Niederspannungswicklung zugeführt wird, ist die Überspannung, die durch Kapazitätswirkung auf die Hochspannungswicklung übertragen wird, stets vernachlässigbar.

2. Magnetische Kopplung. Die übertragenen Überspannungen sind in diesem Fall stets gefährlich, wenn die Stoßspannung an der Niederspannungswicklung liegt. Daher muss auf der Hochspannungsseite in der Nähe der Klemmen ein Überspannungsableiter montiert werden.

Sofern die Stoßspannung an der Hochspannungswicklung liegt, besteht für die Niederspannungswicklung Gefahr, wenn dieselbe offen oder an eine Leitung mit hoher, wenig gedämpfter Eigenfrequenz angeschlossen ist. Die Überspannung kann dann den Wert $2nU$ erreichen, worin n das Windungsverhältnis ist. Es besteht keine Gefahr, wenn der Stromkreis ziemlich gedämpft ist; die Höchstspannung überschreitet dann den Wert nU nicht.

Bei Drehstromtransformatoren ist die Spannung zwischen einer Sekundärklemme und Erde, infolge der möglichen Verschiebungen des Sternpunktpotentials, nicht immer gleich nU oder $2nU$. Die Schaltung Stern-Dreieck zwischen Hoch- und Niederspannungswicklung bewirkt im allgemeinen die Herabsetzung der Überspannungen auf einen zulässigen Wert.

621.3.014.33 : 621.3.018.44

H. Skineffekt bei Blitz-Stromstössen. Referat von S. Szpor. Das Referat, Nr. 323 (Polen), umfasst 23 Seiten Text mit 5 Figuren im Text.

Für die zweckmässige Dimensionierung der Schutzdrähte und Erdseile der langen Freileitungen und grossen Unterwerke ist die Frage der Erwärmung dieser Leiter durch die von Blitzschlägen verursachten Überspannungs- und Stromstösse von Bedeutung. Es handelt sich hierbei um eine Erwärmung durch Skineffekt.

Mit Rücksicht auf die sehr kurzen in Frage kommenden Zeiten kann für die Stromverteilung im Querschnitt folgende partielle Differentialgleichung aufgestellt werden:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} = \gamma \mu \frac{\partial S}{\partial t}$$

in welcher S die Stromdichte, r der Abstand vom Mittelpunkt des Leiterquerschnitts, γ die elektrische Leitfähigkeit, und μ die magnetische Permeabilität bedeuten. Diese Gleichung ist derjenigen von Fourier für Wärmestreuung analog. Ihr Integral lautet:

$$i = 2R\pi \int_0^\infty S dx$$

in welchem R der Radius des Leiters ist. Betrachtet man den Strom i als zeitabhängigen Stromstoss, so ergibt sich:

$$i = \frac{2\sqrt{R\pi}}{\sqrt{\gamma\mu}} \int_0^t \frac{\sigma(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau$$

Diese Beziehung zwischen der Oberflächenstromdichte σ und dem Strom i ermöglicht die Berechnung der Erwärmung der Oberflächenschicht. Da während der verhältnismässig kurzen Zeit des Stosses kein wesentliches Eindringen der Wärme stattfindet, kann man annehmen, dass die Erwärmung in jedem Punkt annähernd durch die frei gewordene Energie bestimmt wird. Diese Energie beträgt für die Volumeneinheit der unmittelbar unter der Oberfläche liegenden Schicht:

$$W = \frac{1}{\gamma} \int_0^\infty \sigma^2(t) dt$$

Der Verfasser zeigt, dass die Erwärmung der Leiteroberfläche durch einen Stromstoss von der elektrischen Leitfähigkeit des Materials unabhängig ist. Er zieht auch verschiedene Stosswellenformen in Betracht. Insbesondere erhält man beim genormten Stoss 1/50 für die Oberflächenenergie

$$W = 0.0434 \mu \left(\frac{i_{\max}}{R} \right)^2$$

wo i_{\max} der Scheitelwert der Stromwelle ist. Die effektive Schichtdicke lässt sich nach der Formel berechnen:

$$x = K \frac{1}{\sqrt{\gamma\mu}} \sqrt{T_0}$$

in welcher T_0 die Frontdauer der Stosswelle und K ein Koeffizient ist, der von der Wellenform abhängt. Man erhält $K=1,13$ für einen rechteckigen Impuls von σ , $K=0,782$ für einen parabolischen Impuls oder einen Stoss 1/50, $K=0,758$ für eine sinusförmige Halbwelle von σ .

Bei Leitern aus ferromagnetischem Metall ist die magnetische Sättigung infolge der sehr hohen Stromstärken (10...100 kA) so stark, dass diese Leiter für den Skineffekt keine grossen effektiven Permeabilitäten aufweisen. Bei $K=0,8$ ist die Schichtdicke x für einige Werte von T_0 in der folgenden Tabelle I angegeben:

Tabelle I

Leitermaterial	Schichtdicke x in mm für Frontdauer T_0		
	$10^{-6}s$	$10^{-5}s$	$10^{-4}s$
Kupfer	0,118	0,373	1,18
Aluminium	0,155	0,490	1,55
Eisen	0,315	0,997	3,15

Die Dicke x ist also, wenn man eine kurze Frontdauer von ungefähr $1 \mu s$ annimmt, im Verhältnis zum Radius der für Erdungen verwendeten Leiter, recht gering.

Ausgehend von der Gleichung von Fourier für die Wärmeabfuhr wird die Schichtdicke x_0 berechnet, die die während des Stromstosses entwickelte Wärme aufspeichert. Die Werte, die für Zeitintervalle von 1...1000 μs gefunden wurden, sind von der Grössenordnung 0,01...0,1 mm und sind also zehnmal geringer als die Dicken der entsprechenden Schichten des Stromdurchgangs. Der Verfasser erachtet es deshalb für zulässig, bei Näherungsberechnungen die radiale Eindringtiefe der Wärme zu vernachlässigen.

Der letzte Teil des Referats behandelt die Berechnung der Erwärmung der Oberflächenschicht. Man kann dann die Wärmeverluste nach aussen vernachlässigen und annehmen, dass die Energie innerhalb der Schicht aufgespeichert wird. Aus dem Ausdruck für die erzeugte Wärmeenergie erhält man den Radius, den man einem Leiter mit Kreisquerschnitt für eine gegebene Erwärmung $\Delta\theta$ geben muss:

$$R = i_{\max} \sqrt{\frac{\mu}{c} \frac{1}{\Delta\theta} n M}$$

wo c die spezifische Wärme des Metalls, n die Zahl der angelegten Stromstösse und M ein Koeffizient ist, der von der Wellenform und vom Verhältnis der Frontdauer zur Halbwertsdauer abhängt. Setzt man für $\Delta\theta=200^\circ C$, $i_{\max}=100$ kA, $n=5$, $M=0,045$ und $\mu=4 \cdot 10^{-9} \mu r$, so erhält man für den Radius R

$$R = 0,291 \sqrt{\frac{\mu r}{c}} \text{ cm}$$

wo μr , die relative Permeabilität bedeutet, und c in W/cm^3 ausgedrückt ist. Die rechnerisch erhaltenen Resultate stimmen mit der Erfahrung gut überein.

621.316.933

I. Die Kontrolle der Überspannungsableiter im Betrieb. Referat von K. Berger. Das Referat, Nr. 328 (Schweiz), umfasst 9 Seiten Text mit 4 Figuren im Text.

Überspannungsableiter zum Schutz der Anlagen gegen Überspannungen atmosphärischen Ursprungs werden insbesondere in Netzen mit Betriebsspannungen zwischen 6 und 45 kV Spannung verwendet.

Die grosse Zahl dieser Geräte stellt das Problem der Kontrolle, das sich nach verschiedenen Methoden lösen lässt. Bei den luftdicht gekapselten Überspannungsableitern beschränkt man sich darauf, nach amerikanischen Vorschlägen die Zündspannung bei Wechselspannung, den Isolationswiderstand oder die Störwirkung auf den Rundfunkempfang zu messen.

Bei den nicht luftdicht gekapselten Ableitern besteht ein einfacheres Verfahren, nämlich die Geräte auseinanderzunehmen und die Zündspuren auf der Funkenstrecke abzuzählen. Dieses Verfahren, das ein Abmontieren erfordert, ist jedoch bei den Überspannungsableitern der nicht bedienten kleinen Unterstationen nicht anwendbar.

Zur Nachprüfung des Zustands der Widerstände müssen Stoßspannungsversuche und Messungen mit dem Kathodenstrahloszillographen vorgenommen werden. Dies sind Versuche, die eine Spezialeinrichtung erfordern.

Diese Erwägungen haben zur Konstruktion von Ansprechzählern geführt, die mit den Überspannungsableitern in Reihe geschaltet werden und die Fälle des Ansprechens registrieren. Diese Geräte gestatten so die Nachprüfung der Frage, ob die Verwendung eines Überspannungsableiters an der betreffenden Stelle gerechtfertigt ist, und ob er während der Gewitterperiode angesprochen hat oder nicht.

Der Verfasser betont, dass diese Zähler keinen Aufschluss darüber geben, ob die Überspannungsableiter im Verhältnis zu ihrem Ableitungsvermögen überlastet wurden oder nicht. Diesbezüglich kann man Bündel aus magnetisierbaren Stahlstäben in der Nähe der Erdleitungen des Überspannungsableiters anordnen. Man kann damit aber nur die Amplitude des Stoßstroms messen. Die Beanspruchung des Überspannungsableiters ist jedoch ausser durch die Amplitude auch durch die Dauer des Stroms bestimmt, so dass sich die Kontrolle auf die Stossenergie erstrecken muss, die im Gerät in Wärme umgesetzt wird. Eine solche Kontrolle wird durch einen «Stossmesszähler» erzielt, der im Prinzip einen in den geerdeten Kreis des Überspannungsableiters geschalteten veränderlichen Widerstand darstellt, mit einer Kennkurve ähnlicher Art wie die des Überspannungsableiters. Den Klemmen dieses Widerstands ist einerseits eine Induktionsspule, und andererseits ein induktionsfreier Widerstand parallelgeschaltet, welcher die Erwärmung der Luft in einem Topf und dadurch die Deformation einer Membran bewirkt, die einen Stossenergiezähler steuert.

621.315.1.015.52

J. Blitzschläge und Häufigkeit des Funkenüberschlags auf Freileitungen. Referat von C. E. R. Bruce u. R. H. Golde. Das Referat, Nr. 336 (Grossbritannien), umfasst 22 Seiten Text mit 9 Figuren und 4 Tabellen im Text.

Der vielseitige Charakter der atmosphärischen Entladungen wird durch die Tatsache hervorgehoben, dass ein Blitzschlag oft mehrere aufeinanderfolgende Entladungen umfasst. Jede dieser Entladungen folgt dem Hauptkanal des ersten Funkens und wird durch eine Vorentladung eingeleitet, die verhältnismässig langsam ihren Weg von der Wolke zum Boden sucht. Wenn die Entladung den Boden erreicht, tritt eine aufsteigende, zurückfliessende Entladung auf, die praktisch den bedeutendsten Teil des Blitzschlags bildet.

Eine genaue Untersuchung hat ergeben, dass sich ungefähr die Hälfte sämtlicher Blitzschläge aus einmaligen Entladungen zusammensetzen, während die Blitzschläge mit zwei, drei und vier Entladungen mit abnehmender Häufigkeit auftreten.

In verschiedenen Ländern wurden mit magnetisierbaren Stäbchen Amplitudenmessungen der Blitzströme durchgeführt, und die erhaltenen Resultate zeigen befriedigende Übereinstimmung. Ungefähr die Hälfte der Blitzschläge entspricht Strömen mittlerer Stärke von 20 kA; der Maximalstrom ist 160 kA. Die durch einen normalen Blitz verschobene Ladung beträgt ungefähr 30 C, von denen ungefähr 10 C auf der Überschlagstrecke selbst ausgeglichen werden.

Während des Fortschreitens der Vorentladung im Boden ändert sich die Ladungsverteilung längst des Leitkanals als Funktion der Kapazität desselben. Die Ladungsverteilung nimmt von der Erde zur Wolke ab; zunächst rasch, dann langsamer, was den bekannten Rücken der Blitzstromwelle zum Teil erklärt. Die Ladung wird seitlich durch den Koronaeffekt des Kanals verteilt. Ihr Ausgleich während der rückläufigen Entladung erfolgt nicht augenblicklich.

Das Potential einer Wolke beträgt wahrscheinlich ungefähr 50 MV.

Der Verfasser schlägt eine Theorie vor, welche die Fortpflanzung der Entladung in den sehr schwachen Feldern der Vorentladung erklärt, deren Stärke die Grössenordnung 100 V/cm aufweist. Er zeigt, dass bei den Fernfreileitungen die Anziehungswirkung des Erdleiters auf den Blitz mit der Amplitude des Entladungsstroms zunimmt. Er gibt Formeln an, welche die Flächen definieren, die bei Leitungen durch die Anziehung der Blitzschläge überdeckt werden. In den Gebieten der gemässigten Zone ist die Zahl der Entladungen pro Quadratkilometer und Jahr ungefähr die Hälfte des entsprechenden isokeraunischen Pegels (der isokeraunische Pegel ist die Zahl der Tage im Jahr, an denen Blitzschläge auftreten), so dass die Zahl der Entladungen in die Leitungen geschätzt werden kann.

Im allgemeinen lässt sich sagen, dass bei normalen Mittelspannungsleitungen ohne Erddraht und mit Spannweiten von ungefähr 160 m Blitzeinschläge etwas häufiger in die Masten als in die Drähte erfolgen.

Bei Leitungen mit längeren Spannweiten und mit Erdseil nimmt das Verhältnis zwischen den direkten Einschlägen in den Erddraht und denjenigen in die Masten rasch zu, bis für Hochspannungsleitungen mit zwei Erdseilen und Spannweiten von rund 300 m die Erdseile ungefähr die doppelte Anzahl von Einschlägen erhalten, als die Masten.

Erdseile, die unterhalb der Phasenleiter montiert sind, weisen eine nur unbedeutende Anziehungswirkung für Blitzschläge auf.

Es kann nachgewiesen werden, dass sich bei Verwendung eines Erdseils die Zahl der direkten Einschläge in ein Netz um rund 30 % erhöhen können. Dies wird jedoch, wenn die Erdungswiderstände der Gittermasten hoch sind, nur die Zahl der Überschläge an den Isolatoren erhöhen. Andererseits sollen die Erdseile nicht nur die direkten Einschläge in die Phasenleiter, sondern auch in die Masten verhindern.

Sofern sich die bis jetzt erhaltenen Resultate als richtig erweisen, müsste es möglich sein, die Häufigkeit der direkten Einschläge in eine Leitung und deren Verteilung zwischen Masten und halben Spannweiten aus den geometrischen Abmessungen der Leitung und der Gewitteranfälligkeit der Gegend zu berechnen. Der Verfasser meint dazu, dass in Zukunft der isokeraunische Pegel durch einen zuverlässigen Faktor ersetzt werden müsste.

621.317.333.82

K. Erwägungen über Stoßspannungsprüfungen für ganze Geräte. Referat von A. E. W. Austen, L. H. Gosland u. H. M. Lacey. Das Referat, Nr. 339 (Grossbritannien), umfasst 20 Seiten Text mit 3 Figuren und 4 Tabellen im Text.

Bei der Einführung der seriemässigen Stoßspannungsprüfung für elektrische Geräte müssen vorerst folgende Fragen beantwortet werden:

1. Rechtfertigt sich diese Prüfmethode zur Auffindung von Isolationsfehlern in Geräten, die danach dem Betrieb zu übergeben sind?

2. Ist es nötig, das Gerät während des Stossversuchs gleichzeitig an die normale Betriebsspannung zu legen?

3. Muss der Stossversuch mit positiver und negativer Polarität ausgeführt werden, wenn ja, in welcher Reihenfolge?

Es werden drei verschiedene Überspannungsarten, die im Betrieb vorkommen können, untersucht, nämlich: Dauerüberspannungen bei normaler Frequenz, durch die Betätigung der Schalter erzeugte, kurzzeitige Überspannungen, durch Blitzschlag hervorgerufene Überspannungen. Die Verfasser entwickeln hierauf eine Theorie, die den Durchschlag der Isolationen erklären soll, die schon bei niedrigeren Stossüberspannungen als bei den im allgemeinen zu erwartenden Werten vorkommen.

Es werden verschiedene Methoden der Isolationsfehler-suche bei Transformatoren untersucht und daraus die folgenden Schlüsse gezogen:

1. Die strengsten Prüfbedingungen werden mit einer Reihe kurz aufeinanderfolgender einzelner Stösse entgegengesetzter Polarität erzielt, oder mit Spannungsschössen gleicher Polarität, die jedoch durch lange Zeitintervalle voneinander getrennt sein müssen.

2. Soll die Isolation eines Gerätes mit Stoßspannungen geprüft werden, so spielt die gleichzeitige Anlegung der normalen Betriebswechselspannung keine bedeutende Rolle für die Auffindung eines Durchschlags.

3. Die Technik zur Bestimmung eines Isolationsdurchschlags zwischen den Windungen einer Transformatorwicklung oder eines entstehenden Durchschlags in der Hauptisolation ist im allgemeinen nicht genügend entwickelt, um die Anwendung von Stoßspannungsprüfungen an Geräten zu rechtfertigen, die hierauf in Betrieb gestellt werden sollen.

4. Die gleichzeitige Anwendung der normalen Betriebswechselspannung und der Stoßspannung kann einen gänzlichen Durchschlag des Dielektrikums bewirken, während bei einem Prüfversuch mit reiner Stoßspannung der Durchschlag bloss eingeleitet würde.

Gruppe 36: Verschiedenes

537.311.1

A. Das Wesen des elektrischen Stroms nach den heutigen Theorien. Referat von M. O. Yadoff. Das Referat, Nr. 326 (Grossbritannien), umfasst 10 Seiten Text.

Der Verfasser beginnt mit einem historischen Überblick über die Theorien, die seit mehr als einem Jahrhundert zur Erklärung der Bewegung der Elektrizität in den Leitern vorgeschlagen wurden.

Im Jahr 1900 stellte *Drude* die erste Theorie auf, die brauchbare Resultate verspricht. Danach bestehen in einem metallischen Leiter freie Elektronen, deren Bewegung von der Temperatur des Metalls abhängig ist.

Jeder Temperatur entspricht eine durch die Wärmebewegung der freien Elektronen verursachte Deformation des Atomnetzes, die einer elastischen Schwingung entspricht. Im Jahre 1912 zeigte *Debye*, dass diese Schwingungen als longitudinale und transversale, sich fortpflanzenden Wellen im Innern des Metalls angesehen werden können.

Unter diesen Voraussetzungen kann man annehmen, dass die Wärmewellen von *Debye* auf die ganz anders gearteten elektronischen Wellen, wie sie von *de Broglie* angenommen wurden, einwirken können, sobald im betrachteten Leiter ein elektrisches Feld entsteht. Die Elektronenwellen, die sich mit dem elektrischen Feld im Leiter einstellen, verformen das Kristallnetz, indem sie die Atome, aus denen das Metall besteht, verschieben und die Elektronenatmosphären der Atome mehr oder weniger deformieren. Umgekehrt wirken auch die Wärmewellen des Metalls auf die Elektronenwellen ein, so dass eine gegenseitige Beeinflussung dieser beiden Wellenarten anzunehmen ist.

Bloch und *Peierls* versuchten die Formänderungen zu ermitteln und kamen zum Schluss, dass die longitudinalen Wärmewellen vorwiegenden Einfluss haben, während die Transversalwellen wenig Wirkung besitzen.

Der Verfasser entwirft eine Theorie, nach welcher auf die erste Wechselwirkung zwischen Elektronenwellen und Wärmewellen eine zweite, bedeutendere Wechselwirkung folgt. Dieser zweite Vorgang besteht im Übergang des Systems, das aus den freien Leitungselektronen und den Atomen des Kristallnetzes besteht, aus einem Quantenzustand in einen andern.

Diese beiden aufeinanderfolgenden Vorgänge bilden nach dem Verfasser das, was man die elektromagnetische Trägheit des Systems nennen kann. Die Zeit, die für die Überwindung der Trägheit nötig ist, entspricht der Zeit, die das System für die Änderung des Quantenzustandes braucht und die nur von den physikalischen Kennwerten des betrachteten Systems abhängt. Es ist dies die Zeit, die zur Bildung des Stroms in einem metallischen Leiter nötig ist.

Die vom Leiter entwickelte Joulesche Wärme wird von den Transversalwellen übertragen, und ist streng von den Quantenzuständen, die die Wärmewellen des Atomnetzes einnehmen können, abhängig. Der Widerstand des Leiters gegen den freien Durchgang der Elektronenwellen wird durch den Zustand der Wärmewellen bestimmt.

Der Verfasser zeigt, dass seine Theorie die Formulierung der Gesetze für die Entstehung und das Verschwinden des elektrischen Stromes in metallischen Leitern ermöglicht.

621.3.016.25 : 621.3.018.7

B. Probleme der Blindleistungs- und Deformationsvorgänge. Referat von C. Budeanu. Das Referat, Nr. 344 (Rumänien), umfasst 13 Seiten Text.

Der Studienausschuss für Blindleistungs- und Deformationsvorgänge der CIGRE hatte bei seiner Zusammenkunft anlässlich der Tagung 1939 ein Programm theoretischer und experimenteller Untersuchungen ausgearbeitet, das die Ursachen und Auswirkungen dieser Vorgänge und die geeigneten Mittel betrifft, mit denen sie in den Industrieanlagen begrenzt und örtlich eingeschränkt werden können.

Um diese durch den Krieg unterbrochenen Arbeiten wieder aufzunehmen, hat sich der Verfasser (als Vorsitzender des Ausschusses) die Aufgabe gestellt, im Referat den Stand des Problems darzulegen.

Die wichtigsten Fragen betreffen die Prüfung der Hochspannungsanlagen hinsichtlich der Blindleistungsvorgänge, nämlich die von den Anlagen geforderte Blindleistung, die übertragene Blindleistung, die nachteiligen Wirkungen der Blindleistungsvorgänge und die Verbesserungsverfahren. Eine ähnliche Untersuchung bezieht sich auf den Umfang und die Auswirkungen der Strom- und Spannungs-Deformationen.

Nach einer klaren Definition der Grössen, die in der Untersuchung der Blindleistungsvorgänge eine Rolle spielen, wiederholt der Verfasser einige theoretische Ausführungen über die deformierende Leistung und die Scheinleistung und über die Rolle der Kapazitäten und Induktionsspulen als deformierende Grössen. Diese sind in zwei verschiedenen Fällen bedeutungsvoll, nämlich wenn C oder L einen periodisch veränderlichen Wert besitzen (z. B. Drosselspulen mit Eisenkern), oder wenn diese Schaltelemente mit nichtsinusförmigen

gen Spannungen oder Strömen gespeisen werden. Die deformierenden Wirkungen der Kapazitäten und Induktionsspulen können sich gegenseitig teilweise oder gänzlich aufheben oder auch addieren. Dies erfolgt jedoch nach anderen Gesetzen als bei Blindleistungsvorgängen. So addieren sich die deformierenden Elementarleistungen zweier Kapazitäten, welche den Harmonischen ihrer in Phase stehenden Klemmenspannungen entsprechen, algebraisch. Die deformierenden Leistungen einer Induktionsspule und einer Kapazität heben einander völlig auf, wenn die Augenblickswerte der Spannung u an der Kapazität und des Stroms i in der Induktionsspule der Beziehung genügen:

$$u = i \sqrt{L/C}$$

Hinsichtlich der experimentellen Nachprüfung der Theorie der Deformationsvorgänge erinnert der Verfasser an einen früher veröffentlichten Aufsatz¹⁾. Die auf dem Gebiet der Deformationsvorgänge noch zu untersuchenden Fragen sind:

a) Wie weit bilden die Deformationsvorgänge ein Problem für die industriellen Grossanlagen? Dabei handelt es sich sowohl um die ausgedehnten Erdkabelnetze, als auch um die Hochspannungs-Freileitungsnetze.

b) Welches ist der Umfang der Deformationsvorgänge, die durch Gleichrichter, Induktionsspulen und Transformatoren mit gesättigtem Eisen, Leitungen mit Koronaeffekt usw. hervorgerufen werden?

c) Welche Wirkungen ergeben sich durch diese Geräte in den Anlagen grosser Leistung?

d) Welches ist die praktische Bedeutung der durch Deformationswirkungen verursachten Hauptnachteile, z. B. Verluste in den induktionsfreien Widerständen, Überspannungen und Spannungsschwankungen, zusätzliche Fehlerursachen für die Messgeräte, Verminderung der verfügbaren Leistung der Anlagen usw.?

e) Welches sind die Möglichkeiten der Beschränkung der Deformationsvorgänge in den Anlagen grosser Leistung?

¹⁾ Budeanu, Constantin: Quelques considérations expérimentales de la théorie des phénomènes déformants. Rev. Gén. Electr. Bd. 48(1940), Nr. 10, S. 229...246.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Abschaltversuche von bis zu 4 370 000 kVA Kurzschlussleistung bei 230 kV im Kraftwerk am Grand Coulee Dam

[Nach W. H. Clagett u. W. M. Leeds: 4 370 000 kVA Short-Circuit Tests on Grand Coulee 230 kV Bus. Electr. Engng., Trans. Sect., Bd. 65(1946), Nr. 11, S. 729...735.]

621.316.57.064.25.0014

Der Grand Coulee Dam ist am Columbia River ungefähr 160 km westlich der Stadt Spokane im Staate Washington gelegen. Die jährlich abfliessende Wassermenge beträgt im Mittel an dieser Stelle rund 100 Milliarden m³ bei einem Nettofälle von 100 m. Nach dem Vollausbau wird das Kraftwerk über zwei gleiche Maschinenanlagen mit je 9 Einheiten zu 108 000 kW, total also rund 2 000 000 kW verfügen. Die gewaltigen Wasserkraftgeneratoren gehören zu den grössten Einheiten, die je gebaut worden sind.

Für die Netzschalter bildet eine derart hohe Maschinenleistung ein besonderes Problem, handelt es sich doch darum, die Abschaltleistung innerhalb des für die Schalter zulässigen Abschaltvermögens zu halten. Die Hochleistungsschalter für jede der abgehenden 230-kV-Leitungen besitzen ein Nenn-Abschaltvermögen von 3 500 000 kVA bei einer Abschaltzeit von rund 3 Perioden oder 5/100 s (bei 60 Hz).

Zur Zeit der Abschaltversuche im Dezember 1945 betrug die verfügbare Kraftwerkleistung 6 Einheiten zu 108 000 kW und zwei Einheiten zu 75 000 kW. Kurzschlussstrom-Berechnungen für einen Kurzschluss in unmittelbarer Nähe der 230-kV-Sammelschienen ergaben für die Linienschalter eine beträchtlich höhere Abschaltleistung als 3 500 000 kVA, sobald mehr als 4 Generatoren und mehr als 3 Leitungen auf die Kurzschlussstelle geschaltet sind. Aus diesem Grunde wurde eine Schaltung nach Fig. 1 gewählt, bei der einerseits

für jeden Sammelschienenabschnitt der Maschineneinsatz von 4 Einheiten nicht überschritten wird, andererseits aber doch eine synchronisierende Verbindung zwischen ihnen bestehen bleibt. Wie Fig. 1 zeigt, sind benachbarte Sammelschienenabschnitte über je 2 parallele Leitungen miteinander verbunden. Diese Aufteilung hat allerdings zur Folge, dass z. B. bei einer Revision eines 230-kV-Schalters 2 Generatoreinheiten ausser Betrieb genommen werden müssen, was nicht nötig wäre, wenn die Schalter 5 000 000 kVA bewältigen könnten.

In Anbetracht der konzentrierten Netzbelastung und der weiten Distanzen zwischen den unter sich verbundenen Netzen (Grand Coulee und Bonneville Power Administration) spielt ein rasch arbeitender Relaischutz in Verbindung mit Schnellschaltern eine aussergewöhnlich grosse Rolle für die Erhaltung der Stabilität.

Die 230-kV-Oelschalter sind Einkesseltypen für einpolige Unterbrechung und sind mit zwei Kondensatordurchführungen mit herausgeführtem Spannungsbelag ausgerüstet. Dieser Belag diente während der Versuche zur oszillographischen Aufnahme der Spannung über die Schaltstrecke. Jede Gruppe von 3 gekuppelten Schaltern besitzt einen gemeinsamen Druckluftantrieb, welcher die Einschaltung in rund 1/3 s gestattet. Die Kontakttrennung wird durch Schnellauslösung innerhalb 1,5 Perioden bewerkstelligt. Für die Kurzschlussversuche wurde der Antriebsmechanismus durch einen Hilfschalter derart gesteuert (Vorauslösung), dass die Amplitude des Kurzschlussstromes gerade im Moment der Kontaktöffnung auftrat. Fig. 2 zeigt die zwei in jedem Schalterpol eingebauten «Deion»-Gitter-Isolierkammern, im Zustande nach Beendigung der Abschaltversuche.

Bei einer ersten Serie Abschaltversuche an einer unbelasteten 230-kV-Leitung von rund 300 km Länge unterbrach