Kondensatoren als Schutz gegen Ausschaltspannungen bei Gleichstrommaschinen hoher Spannung und bei Drosselspulen.

Von

W. Rogowski.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

1. Ziel. Der Anker einer Gleichstrommaschine für hohe Spannung besitzt gewöhnlich eine nicht unbeträchtliche Induktivität. Wird der Belastungsstrom plötzlich abgeschaltet, so sind hohe Ausschaltspannungen zu befürchten. Daß sie tatsächlich auftreten, beweisen häufig beobachtete Durchschläge. Es ist also gut, den Anker einer Gleichstromhochspannungsmaschine durch einen parallel geschalteten Kondensator gegen Ausschaltspannungen zu schützen.

Wie groß soll man nun den Schutzkondensator nehmen? Diese Frage wird man nach folgendem Gesichtspunkt beantworten wollen. Die Maschine gebe normal eine Spannung von E Volt. Wir wollen beim Ausschalten eine Spannungssteigerung vom mE Volt als zulässig ansehen. Je nach der Güte der Isolierung und der Höhe der normalen Spannung wird man m kleiner, gleich oder höher als 1 setzen. Ist C die Kapazität des Schutzkondensators, K die Eigenkapazität der Maschine (beide gemessen in Farad), so soll somit der Kondensator durchschnittlich nicht mehr elektrische Schwingungsenergie als

$$W_e = \frac{1}{2}(C + K)m^2E^2 \text{ Wattsekunden} \quad 1)$$

aufnehmen. Wir werden nun den Schutzkondensator so groß wählen wollen, daß dieser Betrag mit der magnetischen Energie W_m übereinstimmt. Diese beträgt, wenn J den Ankerstrom, $L = (L_A + L_W)$ die Induktivität des Ankers und der Wendepole in Henry bedeutet,

$$W_m = \frac{1}{2}L \cdot J^2 \text{ Wattsekunden.} \quad 2)$$

Aus 1) und 2) folgt nun

$$C + K = L \frac{J^2}{m^2 E^2} \text{ Farad.} \quad 3a)$$

Die Maschinenkapazität K wird im allgemeinen klein gegen die Schutzkapazität C sein. Alsdann hat man zu fordern:

$$C = L \frac{J^2}{m^2 E^2} \cdot 10^6 \text{ Mikrofarad.} \quad 3b)$$

Beispiel: Bei einer Gleichstromhochspannungsmaschine für 5000 Volt und für eine Stromstärke von 1 A mögen der Anker eine Induktivität von 12, die Wendepole eine Induktivität von 8 Henry haben. Es werde eine Spannungssteigerung auf das Doppelte der normalen Spannung zugelassen: $m = 2$; $mE = 5000$ Volt. Dann müssen wir dem Schutzkondensator die Kapazität

$$C = \frac{20 \cdot 1^2}{1^2 \cdot 5000^2} \cdot 10^6 = 0,8 \text{ Mikrofarad}$$

geben.

Ich habe dieses Beispiel angeführt, um zu zeigen, daß zu einem sicheren Schutz großer Induktivitäten sehr große Kondensatoren gehören.

Nun wird man folgendes einwenden können:

Eine Kapazität von der Größe 3) ist nur dann notwendig, wenn der Belastungsstrom plötzlich abgeschaltet wird. In Wirklichkeit wird die Abschaltung durch den Ausschaltlichtbogen gemildert. Sie vollzieht sich nicht in unendlich kurzer, sondern in endlicher, wenn auch kleiner Zeit. Es liegt daher im Bereiche der Möglichkeit, daß für praktische Ausschaltzeiten die Maschine auch dann noch geschützt ist, wenn ihr ein kleinerer Kondensator, als ihn die Vorschrift 3) verlangt, parallel geschaltet wird.

Die vorliegende Arbeit will nun beweisen, daß eine Maschine für lange Abschaltzeiten bereits durch ihre Eigenkapazität geschützt ist. Für lange Abschaltzeiten brauchen wir sie daher nicht erst besonders zu schützen. Ein der Maschine parallel geschalteter Kondensator wirkt erst dann als Schutz, wenn die Ausschaltzeit so kurz ist, daß der Kondensator praktisch die gesamte magnetische Feldenergie in sich aufnehmen muß. Es hat daher, solange es nur auf Ausschaltspannungen ankommt, keinen Zweck, der Maschine einen Kondensator parallel zu schalten, der kleiner ist, als ihn die Vorschrift 3) verlangt. Tut man es doch, so erhält man keinen wirklichen, sondern nur einen vermeintlichen, einen „Pseudoschutz“.

2. Die mathematisch-technische Aufgabe. Wir werden die Gleichstromhochspannungsmaschine als ein Gebilde mit der Induktivität L und der Eigenkapazität K ansehen, in dem eine Gleichspannung E induziert wird (Fig. 1). Den Widerstand vernachlässigen wir. Die Eigenkapazität bringen wir durch einen der Induktivität L parallel geschalteten Kondensator zum Ausdruck. Liegt der Maschine außerdem noch eine Schutzkapazität C parallel, so wirkt diese wie eine Vergrößerung der Eigenkapazität. Den

Fig. 1. Das Schaltschema.

Fig. 2. Die dem Strom i_3 vorgeschriebene Änderung.

Klemmen der Maschine werde ein Gleichstrom J_3 entnommen. Zur Zeit $t=0$ werde dieser abgeschaltet. Es sinkt somit der Strom (Fig. 2) vom Zeitpunkte $t=0$ ab nach irgendeinem, zunächst nicht genauer anzugebenden Gesetze vom Wert J_3 auf Null herab. Da es im folgenden zunächst nur darauf ankommt, den großen Zügen nach den Einfluß einer längeren oder kürzeren Ausschaltzeit zu übersehen, so wollen wir annehmen, der Strom J_3 sinke geradlinig mit der Zeit auf Null herab. Wir setzen also

$$i_3 = J_3 (1 - at). \quad (4)$$

Dieser Ansatz besagt, daß die Abschaltung des Stromes i_3 in der Zeit $\tau = \frac{1}{a}$ beendet ist. Durch Verfügung über a haben wir es daher in der Hand, längere oder kürzere Ausschaltzeiten darzustellen. Natürlich hätten wir statt des linearen Ansatzes 4) andere Ansätze, etwa quadratische oder solche höherer Ordnung einführen können. Indessen werden wir sehen, daß unser Ansatz 4) bereits genügt, um das Abschaltproblem ziemlich allgemein zu überblicken.

Die eigentliche Aufgabe besteht nur darin, unter den oben mitgeteilten Voraussetzungen die maximale Klemmenspannung der Maschine zu berechnen.

3. Die mathematische Lösung. Die Hauptgleichungen lauten für unseren Fall offenbar:

$$E = L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C+K} \cdot \int i_2 dt \quad (5)$$

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (6)$$

$$i_3 = J_3 \text{ für } t \leq 0; \quad i_3 = J_3(1 - at) \text{ für } 0 \leq t \leq \frac{1}{a}; \quad i_3 = 0 \text{ für } t \geq \frac{1}{a}.$$

Für die Zeit vor der Abschaltung ($t \leq 0$; Gleichstrombelastung) ist, wie man ohne weiteres sieht, $i_3 = J_3$; $i_2 = 0$ und die Kondensatorspannung

$$\frac{1}{C + K} \int i_2 dt = V_2 = E. \quad (8)$$

Wir beseitigen aus den Gl. 5) und 6) den Strom i_1 und erhalten:

$$E - L \frac{di_3}{dt} = L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C + K} \int i_2 dt \quad (9)$$

oder, indem wir die Kondensatorspannung

$$V_2 = \frac{1}{C + K} \int i_2 dt \quad (10)$$

einführen:

$$E - L \frac{di_3}{dt} = L(C + K) \frac{d^2 V_2}{dt^2} + V_2. \quad (11)$$

Für die Abschaltzeit ($0 \leq t \leq \frac{1}{a}$) berechnen wir $L \frac{di_3}{dt}$ aus dem Ansatz 4). Wir finden

$$-L \frac{di_3}{dt} = J_3 L a. \quad (12)$$

Nach vollendeter Abschaltung ist

$$-L \frac{di_3}{dt} = 0. \quad (13)$$

Es gilt somit für die Abschaltzeit ($0 \leq t \leq \frac{1}{a}$) die Differentialgleichung:

$$E + J_3 L a = L(C + K) \frac{d^2 V_2}{dt^2} + V_2 \quad (14)$$

und die Lösung:

$$V_2 = E + J_3 L a + A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (15)$$

$$\left(0 \leq t \leq \frac{1}{a}\right)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L(C + K)}. \quad (16)$$

Nach vollendeter Abschaltung haben wir zu schreiben:

$$E = L(C + K) \frac{d^2 V_2}{dt^2} + V_2 \quad (17)$$

und

$$V_2 = E + F \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (18)$$

$$\frac{1}{a} \leq t < \infty.$$

Der Lösung 15) muß vorgeschrieben werden, daß zur Zeit $t = 0$ (Beginn der Abschaltung) die Spannung $V_2 = E$ und der Strom $i_2 = 0$ ist.

Die Konstanten A und B haben somit die Forderungen zu erfüllen:

$$\left. \begin{aligned} E &= E + L J_3 a + B \\ i_{2t=0} &= (C + K) \frac{dV_2}{dt_{t=0}} = 0 = A \omega (C + K) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Es ist somit

$$A = 0$$

$$B = -L J_3 a.$$

Während der Abschaltzeit wird daher die Kondensatorspannung durch den Ausdruck:

$$V_2 = E + L J_3 a \{1 - \cos \omega t\} \quad (20)$$

$$\left(0 \leq t \leq \frac{1}{a}\right)$$

beschrieben.

Aus ihm folgt für den Zeitpunkt $t = \frac{1}{a}$, mit dem die Abschaltung endigt,

$$V_2\left(t = \frac{1}{a}\right) = E + L J_3 a \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right) \quad (21)$$

$$i_2\left(t = \frac{1}{a}\right) = L J_3 a \omega (C + K) \sin \frac{\omega}{a}. \quad (22)$$

Die Konstanten F und D im Ausdruck 18) müssen nun so bestimmt werden, daß sich für die Zeit $t = \frac{1}{a}$ die Werte 21) und 22) ergeben. Dies trifft zu, wenn diese Konstanten die folgenden Gleichungen befriedigen:

$$L J_3 a \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right) = F \sin \frac{\omega}{a} + D \cos \frac{\omega}{a} \quad (23)$$

$$L J_3 a \sin \frac{\omega}{a} = F \cos \frac{\omega}{a} - D \sin \frac{\omega}{a} \quad (24)$$

Man findet leicht, daß man setzen muß:

$$F = L J_3 a \sin \frac{\omega}{a} \quad (25)$$

$$D = -L J_3 a \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right). \quad (26)$$

Nach vollendeter Abschaltung $\frac{1}{a} \leq t < \infty$ hat man für die Kondensatorspannung zu schreiben:

$$V_2 = E + L J_3 a \sin \frac{\omega}{a} \cdot \sin \omega t - L J_3 a \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right) \cos \omega t \quad (27)$$

Der besseren Übersicht wegen stellen wir unsere Ergebnisse zusammen. Es ist vor der Abschaltung

$$V_2 = E; \quad (28)$$

während der Abschaltung $0 \leq t \leq \frac{1}{a}$

$$V_2 = E + L J_3 a \cdot (1 - \cos \omega t); \quad (29)$$

nach der Abschaltung $\frac{1}{a} \leq t < \infty$

$$V_2 = E + L J_3 a \left[\sin \frac{\omega}{a} \cdot \sin \omega t - \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right) \cos \omega t \right]. \quad (30)$$

4. Diskussion der Lösung. Wir müssen zwei Fälle unterscheiden:

I. a sei sehr groß, so daß $\frac{\omega}{a}$ eine kleine Zahl ist, etwa $\frac{\omega}{a} \leq \frac{\pi}{10}$. Das heißt [vgl. Ansatz 4)] der Ausschaltvorgang ist in einer Zeit beendet, die gleich oder kleiner als der 20. Teil der Schwingungsdauer des aus Maschine und Schutzkondensator gebildeten Schwingungskreises ist.

Alsdann steigt die Kondensatorspannung während der Abschaltung dauernd an und erreicht am Schluß derselben den Wert

$$V_2\left(t=\frac{1}{a}\right) = E + L J_3 a \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right) \approx E + L J_3 a \cdot \frac{\omega^2}{2a^2} = E + L J_3 \omega \cdot \frac{\omega}{2a} \quad (31)$$

Nach vollendeter Abschaltung [Ausdruck 30)] steigt die Kondensatorspannung weiter an und pendelt in Schwingungen um ihren Durchschnittswert E . Die Amplitude der Schwingung beträgt:

$$L J_3 a \sqrt{\sin^2 \frac{\omega}{a} + \left(1 - \cos \frac{\omega}{a}\right)^2} = L J_3 a \cdot 2 \left| \sin \frac{\omega}{2a} \right|.$$

Bei kleinem Werte von $\frac{\omega}{a}$ hat man daher für die größte Spannungserhöhung

$$\Delta E = L J_3 \omega \quad (32)$$

zu schreiben. Durch Einsetzen des Wertes 16) für ω , überzeugt man sich leicht, daß der hier behandelte Fall gleichbedeutend mit der Forderung ist, daß sich die gesamte magnetische Energie des Ankers in elektrische umsetzen soll. Führen wir für die maximale Spannungssteigerung wieder die S. 345 aufgestellte Forderung ein, so gelangen wir auch jetzt noch zu den Ausdrücken 3) zurück.

Solange der Abschaltvorgang sich in einer Zeit abspielt, die klein gegen die Dauer einer Viertelschwingung des durch Maschine und Kondensator gebildeten Schwingungskreises ist, ist eine Maschine nur dann geschützt, wenn sie einen nach 3) bemessenen Kondensator erhält.

2. Es sei die Ausschaltdauer groß im Vergleich zur Schwingungsdauer des Maschinenkreises. In diesem Falle vollführt die Spannung am Kondensator auch während der Abschaltzeit Schwingungen. Die höchste Spannung übertrifft die Spannung E um

$$L J_3 2a \text{ Volt.} \quad (33)$$

Es ist praktisch, die Ausschalzeit $\tau = \frac{1}{a}$ mit der Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{L \cdot (C+K)}$ in Vergleich zu setzen. Es sei

$$\tau = \frac{1}{a} = \lambda T = \lambda \cdot \frac{2\pi}{\omega}. \quad (34)$$

Die Verhältniszahl λ gibt also an, wieviel Schwingungen des Maschinenkreises auf die Abschaltzeit τ kommen. Während der Abschaltung beträgt die Spannungssteigerung

$$L J_3 \cdot \frac{2}{\lambda T} = L J_3 \frac{\omega}{\pi \lambda} \text{ Volt.} \quad (35)$$

Die Spannungsgefahr am Kondensator während der Abschaltung nimmt somit umgekehrt proportional mit der Ausschalzeit τ ab.

Nach der Abschaltung schwingt der Kondensator mit einer Amplitude von

$$L J_3 \cdot \frac{2}{\lambda T} \cdot \sin \frac{\omega}{2} \lambda T \quad (36)$$

weiter.

Es kann gerade der Fall eintreffen, daß $\omega \frac{\lambda}{2} T = \lambda \pi$ ein vielfaches von π ist. Dies trifft zu, wenn λ eine ganze Zahl ist. Alsdann ist die Amplitude 36) Null. Der Kondensator bleibt nach der Abschaltung auf der Spannung E . Es trat die Spannungserhöhung 33) nur während der Abschaltung auf.

Wenn aber λ ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{1}{2}$ ist, dann ist $\left| \sin \omega \frac{\lambda T}{2} \right| =$

$= |\sin \lambda \pi| = 1$. Es tritt alsdann nach der Abschaltung dieselbe Spannungssteigerung auf wie während der Abschaltung.

Die Spannungssteigerung nach dem Abschalten ändert sich mit der Abschaltedauer nach der dünn gezeichneten Kurve der Fig. 3. Für die Amplitude der Spannungssteigerung während des Abschaltens gilt die stark gezeichnete Kurve. Uns kommt es nun auf die maximale Spannungssteigerung ΔE während und nach dem Abschalten an [Formel 32) und 35)]. Wir können für die gesuchte Spannungssteigerung schreiben:

Fig. 3. Ausschaltspannung und Ausschaltzeit.

$$\Delta E = LJ_3 \frac{\omega}{\lambda \pi}, \quad \text{wenn } \lambda \geq \frac{1}{2} \quad 37)$$

und

$$\Delta E = LJ \omega, \quad \text{wenn } \lambda \leq \frac{1}{10} \quad 38)$$

Für das Intervall $\frac{1}{10} < \lambda < \frac{1}{2}$ könnte eine weitere Annäherungsformel leicht aus

den für beliebige Werte von λ gültigen Gleichungen abgelenkt werden. Doch ist dies nicht notwendig, da die Ausdrücke 37) und 38) bereits genügend genau den Verlauf der Spannungssteigerung festlegen. Ihre Figur stimmt mit der stark gezeichneten Kurve Fig. 3 überein.

Wir entnehmen der Fig. 3 folgendes: Ist die Abschaltedauer gleich oder größer als die Schwingungsdauer des Maschinenkreises, so nimmt die Ausschaltspannung umgekehrt proportional der Schaltdauer ab. Der Abschaltfunke wirkt in diesem Gebiete somit stark schwächend auf die Ausschaltspannungen.

Wir wollen uns nun über die Ausschaltspannungen bei einer Maschine unterrichten, erstens, wenn sie ungeschützt ist und ihr somit nur ihre Eigenkapazität K zukommt; zweitens, wenn ihr ein kleiner Kondensator k parallel geschaltet ist, dessen Kapazität mit K von gleicher Größenordnung sein soll; drittens, wenn die Maschine einen großen Kondensator C erhalten hat. Um einen besonderen Fall vor Augen zu haben, ziehen wir wieder das Beispiel S. 345 heran. Unsere dort gemachten Angaben ergänzen wir durch die Mitteilung, daß die Maschine eine Eigenkapazität von $\frac{2}{100}$ Mikrofarad haben soll. Wir wollen $k = \frac{4}{100}$ Mikrofarad und $C = 0,8$ Mikrofarad wählen. Die ungeschützte Maschine kann mit einer Kreisfrequenz

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LK}} = \sqrt{\frac{1}{20 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}} = 1580 \text{ sec}^{-1} \quad 39)$$

schwingen.

Die zugehörige Schwingungsdauer beträgt

$$T_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LK} = \frac{1}{251} \text{ sec.}$$

Wird der Maschine der kleine Kondensator parallel geschaltet, so sinkt die Kreisfrequenz auf

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L(K+k)}} = \frac{1}{\sqrt{20 \cdot (2+4) \cdot 10^{-8}}} = 914 \text{ sec}^{-1}. \quad 40)$$

Die Schwingungsdauer steigt auf

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{L(K+k)} = \frac{1}{145} \text{ sec.} \quad 41)$$

Bei dem großen Kondensator ergibt sich die Kreisfrequenz noch niedriger zu

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L(K+C)}} = \frac{1}{\sqrt{20(2+80) \cdot 10^{-8}}} = 250 \text{ sec}^{-1} \quad (42)$$

$$T_3 = \frac{1}{40} \text{ sec.}$$

Der normale Belastungsstrom betrage 1 Ampere. Dann kann im ungünstigsten Falle bei der ungeschützten Maschine die Überspannung

$$\Delta E_1 = LJ\omega_1 = 20 \cdot 1 \cdot 1580 = 31600 \text{ Volt}$$

auftreten. Bei parallel geschaltetem kleinen Kondensator ergibt sich die Überspannung

$$\Delta E_2 = LJ\omega_2 = 20 \cdot 1 \cdot 914 = 18280 \text{ Volt}$$

und bei angeschlossenem großen Kondensator die Überspannung

$$\Delta E_3 = LJ\omega_3 = 20 \cdot 1 \cdot 250 = 5000 \text{ Volt.}$$

In Fig. 4 sind auf der Ordinate die angegebenen drei Spannungen eingetragen.

Es sei nun die Ausschaltzeit $\frac{1}{a}$ groß gegen $\frac{1}{40}$ Sekunden. Wir setzen nach 34)

$$\frac{1}{a} = \lambda_3 T_3 = \frac{\lambda_3}{2\pi} \sqrt{L(K+C)} \quad (43)$$

Dann ist die Ausschaltzeit erst recht groß gegen T_2 und T_1 . In bezug auf diese Schwingungszeiten sei

$$\frac{1}{a} = \lambda_2 T_2 = \frac{\lambda_2}{2\pi} \sqrt{K+k} \quad (44)$$

$$\frac{1}{a} = \lambda_1 T_1 = \frac{\lambda_1}{2\pi} \sqrt{LK} \quad (45)$$

Es besteht somit die Beziehung

$$\lambda_3 \cdot \sqrt{L(C+K)} = \lambda_2 \cdot \sqrt{L(K+k)} = \lambda_1 \cdot \sqrt{LK}$$

oder

$$\lambda_2 = \lambda_3 \cdot \sqrt{\frac{C+K}{K+k}} = \lambda_3 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_3}$$

$$\lambda_1 = \lambda_3 \cdot \sqrt{\frac{C+K}{K}} = \lambda_3 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_3}$$

In unserem Falle ist

$$\lambda_2 = \lambda_3 \cdot \sqrt{\frac{82}{6}} = \lambda_3 \cdot 3,7$$

$$\lambda_1 = \lambda_3 \cdot \sqrt{\frac{82}{2}} = \lambda_3 \cdot 6,4.$$

Wir greifen nun einen beliebigen Wert von λ_3 etwa $\lambda_3 = 4$ heraus. Die Abschaltung geschieht in $\frac{1}{10}$ Sekunden. Alsdann ist $\lambda_2 = 4 \cdot 3,7 = 14,8$ und $\lambda_1 = 4 \cdot 6,4 = 25,6$.

Es tritt somit bei der durch den großen Kondensator geschützten Maschine die Spannung auf:

$$\Delta E_3 = \frac{5000}{4 \cdot \pi} = 400 \text{ Volt.}$$

Bei der ungeschützten Maschine erhalten wir:

$$\Delta E_1 = \frac{31600}{\pi \cdot 25,6} = 400 \text{ Volt,}$$

und bei der Maschine mit kleinem Kondensator:

$$\Delta E_2 = \frac{18280}{\pi \cdot 14,8} = 400 \text{ Volt.}$$

Wir erhalten somit das überraschende Ergebnis, daß die Maschine dieselbe Spannungsbeanspruchung erfährt, gleichgültig, ob ihr ein großer oder kleiner Kondensator parallel liegt. Diese Aussage gilt, solange λ_3 größer als $\frac{1}{2}$ angesehen und daher Formel 38)

$$\Delta E = L J \frac{\omega}{\pi \lambda}$$

Gültigkeit hat. Der Grund für die überraschende Übereinstimmung der drei Spannungen liegt daran, daß bei großem Kondensator die Kreisfrequenz ω groß und λ mäßig ist.

Fig. 4.

- a = Ausschaltspannung der ungeschützten Maschine.
Eigenkapazität $\frac{2}{100}$ Mikrofarad.
- b = Ausschaltspannung der geschützten Maschine.
Schutzkapazität $\frac{4}{100}$ Mikrofarad.
- c = Ausschaltspannung der geschützten Maschine.
Schutzkapazität 0,8 Mikrofarad.

kleinen Kondensator und die ungeschützte Maschine steigen noch weiter und trennen sich erst bei $\lambda_2 = \frac{1}{2}$. Jetzt beginnt die Kurve für die Überspannungen des kleinen Kondensators sich abzulösen und bei 18 280 V auf der Ordinatenachse zu endigen. Die Spannungs-kurve für die ungeschützte Maschine steigt noch weiter bis auf 31 600 Volt.

Wir ziehen aus der Betrachtung der Fig. 4 folgenden Schluß:

Ein der Maschine parallel geschalteter Kondensator vermindert nicht immer die Ausschaltspannung. Er tut es nur dann, wenn die Abschaltung des Stromes genügend rasch vor sich geht. Und zwar muß sie sehr viel kürzere Zeit erfordern als eine Schwingung des aus Kondensator und Maschine gebildeten Kreises. In diesem Falle kann die Abschaltung als plötzlich angesehen werden. Die gesamte magnetische Energie des Ankers wird vom Kondensator aufgenommen.

Soll ein Kondensator daher ein wirklicher und nicht nur ein vermeintlicher Schutz sein, so muß er die durch 3) angegebene Größe haben.

Bei kleinem Kondensator liegt der Wert der Kreisfrequenz ω höher als bei großem Kondensator. Dafür ist aber in demselben Verhältnis die Zahl λ gewachsen. Der Kondensator mag daher eine Kapazität haben, welche man will, das Verhältnis $\frac{\omega}{\lambda}$ ist bei gegebener Ausschaltzeit und gegebener Maschineninduktivität für alle Werte ein und dasselbe.

Bis zum Werte $\lambda_3 = \frac{1}{2}$, bis zu dem der Ausdruck 38) Gültigkeit hat, fallen daher die Überspannungskurven für alle drei Kondensatoren ineinander; von da ab biegt die Kurve für den großen Kondensator ab und mündet bei $\Delta E_{\max} = 5000 \text{ V}$ in die Ordinatenachse. Die Spannungskurven für den

5. Erweiterung. Unsere Ausführungen gelten zunächst nur für geradlinige Ausschaltkurven. Die wirklichen Ausschaltkurven sind im allgemeinen nicht geradlinig. Es ist möglich, daß es Ausschaltkurven gibt, bei denen sich auch ein kleinerer Kondensator, als Formel 3) ihn fordert, als nützlich erweist. Es lassen sich aber andererseits auch Ausschaltkurven angeben, bei denen ein solcher Kondensator geradezu schadet. Die erste Aussage wird man ohne weiteres glauben. Die zweite will ich beweisen.

Wir teilen die als groß angenommene Abschaltzeit in gleiche Intervalle. Jedes Intervall soll groß gegen die Schwingungsdauer T_g der mit einem zu kleinen Kondensator geschützten Maschine sein. Die Intervalle sind dann erst recht groß gegen die Schwingungsdauer T_u der ungeschützten Maschine. Nun sei noch angenommen, daß das Intervall gerade gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Schwingungsdauer T_u und gleich einem ungeradzahigen Vielfachen der halben Schwingungsdauer T_g sei. Durch passende Verfügung über die Größe des Schutzkondensators läßt sich diese Annahme verwirklichen. Wir stellen uns nun eine Ausschaltkurve dadurch her, daß wir zwischen den Intervallen gerade aneinanderstoßende Linien ziehen. Deren Neigung ist gleichgültig. Für jedes abgesteckte Intervall gelten nun die Rechnungen des Abschnittes 3. Während des ersten Intervalles ist die maximale Spannung gleich

$E + L J \frac{\omega_u}{\pi \lambda_u}$ oder gleich $E + L J \frac{\omega_g}{\pi \lambda_g}$. Der Index u bezieht sich auf die ungeschützte,

der Index g auf die geschützte Maschine. Am Ende des ersten Intervalles hat der Augenblickswert der Spannung (Formel 29) bei der ungeschützten Maschine gerade den Wert E. Würde sich daher nach dem ersten Intervall der Strom J nicht weiter ändern, so bliebe am Kondensator die Spannung dauernd E. Bei der geschützten Maschine dagegen hat am Ende des ersten Intervalles die Spannung den Wert $E + L J \frac{\omega_g}{\pi \lambda_g}$.

Würde sich der Strom bei der geschützten Maschine nach dem ersten Intervall nicht ändern, sondern konstant bleiben, so würde die Kondensatorspannung sich von nun an gemäß dem Ausdruck $E + L J_1 \frac{\omega_g}{\pi \lambda_g} \sin \omega_g t$ ändern. Im zweiten Intervalle ist bei der ungeschützten Maschine die maximale Spannung $E + L J_2 \frac{\omega_u}{\pi \lambda_u}$. Bei der geschützten

Maschine dagegen ist sie größer gleich $E + L J_1 \frac{\omega_g}{\pi \lambda_g} + L J_2 \frac{\omega_g}{\pi \lambda_g}$ usf. Man sieht, daß bei einer so gebildeten Ausschaltkurve die maximale Spannung bei der ungeschützten Maschine kleiner ausfallen wird als bei der mit einem Kondensator geschützten Maschine.

Die in Fig. 5 konstruierte Ausschaltkurve liegt zwar im Bereiche der Möglichkeit. Sie ist aber keine wahrscheinliche Ausschaltkurve. Wollte man das Ausschaltproblem in seiner Allgemeinheit anfassen, so müßte man erst die Frage nach den wahrscheinlichen Ausschaltkurven beantworten¹⁾. Ich gehe indessen hierauf nicht weiter ein, da der Glaube an den Nutzen eines Kondensators, der kleiner als nach Vorschrift 3) bemessen ist, bereits durch das Mitgeteilte genügend stark erschüttert sein dürfte.

Fig. 5. Ausschaltkurve.

¹⁾ Ich verweise auf die Arbeit von E. Philipp: „Über Ausschaltvorgänge und magnetische Funkenlöschung“, Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes 1909, S. 469 u. flgde. Für die oben angeschnittene Frage kommt zwar nur der Abschnitt 3b) in Betracht. Doch enthält die Arbeit viele verwandte wertvolle Betrachtungen und Untersuchungen über das Ausschaltproblem.

Die Erfahrung lehrt, daß man ungeschützte Drosselspulen viele Male ausschalten kann, ohne daß sie durchschlagen. Unsere Fig. 4 gibt die Erklärung. Erfolgt die Abschaltung „genügend langsam“, so schlägt die Spule nicht durch. „Genügend langsam“ heißt in diesem Falle, die Ausschaltzeit muß größer sein als die Schwingungszeit aus Spule und einen ihr parallel geschalteten nach 3) bemessenen Kondensator. Sobald die Abschaltung rasch genug erfolgt, schlägt die Spule durch.

Beim Abschalten einer Induktivität wird man daher Schalter, die eine langsame Unterbrechung begünstigen, vorziehen. Schnappschalter sind, wie die Praxis bereits längst herausgefunden hat, ganz zu verwerfen. Es wäre lohnend, für eine Reihe gebräuchlicher Schalter durch den Versuch Ausschaltkurven aufzunehmen und ihre Spannungen mit der vorgetragenen Theorie zu vergleichen.

Grundlagen zur Konstruktion eines neuen Durchführungsisolators.

Von

Adolf Bolliger, Zürich.

Im 8. und 9. Hefte, Jahrg. 1914 dieser Zeitschr., erschien die Arbeit über Hochspannungsisolatoren von Karl Kuhlmann, zu deren Mitarbeit ich herangezogen worden war. Damals faßte ich die Ideen, welche mich kurz darauf zur Konstruktion des in dieser Schrift besprochenen Durchführungsisolators geführt haben. Die Konstruktion von Kraftlinienbildern läßt leicht die unzuweckmäßige Verteilung des Feldes bei den bestehenden Durchführungsisolatoren erkennen, ist aber auch imstande, die der günstigsten Potentialverteilung entsprechenden Leiterformen zu finden. Daß hierfür den

Fig. 1.

graphischen Methoden gegenüber den analytischen Methoden der Vorzug zu geben ist, dürfte zum Beispiel der Vergleich von Fig. 1 vorliegender Arbeit mit Fig. 3 der seitdem von J. Spielrein erschienenen Abhandlung (3. Heft, Jahrg. 1915 dieser Zeitschr.) zeigen. Spielrein hat dort versucht, eine Luftdurchführung mit möglichst konstanter Feldstärke zu konstruieren. Er hat für das Verhältnis der Radien an der weitesten und engsten Stelle seines Hochspannungsbolzens, welches für die günstigsten Leiterformen eine Konfigurationskonstante darstellt, den Wert 4 erhalten, während meine Fig. 1 und 2 den Wert 1,6 ergeben. Die entsprechende Abänderung meines Kraftlinienbildes (Fig. 2) auf die von Spielrein ermittelten Leiterformen würde zeigen, daß bei jener Durchführung am Wulste des Hochspannungsbolzens und am innern Rande der Niederspannungsfassung relativ hohe Feldstärken auftreten würden. Um die richtige Potentialverteilung im Innern des Isolators zu erreichen, muß man auch das Ver-

halten des Feldes in der Umgebung desselben betrachten. Das Kraft- bzw. Φ -Linienbild dieser Schrift ist nach dem in der Kuhlmannschen Arbeit angegebenen Verfahren gezeichnet worden und entspricht — wie dies übrigens auch bei den dortigen Bildern der Fall ist — rotationsförmigen Leitern. Spielrein hat dies in seiner Arbeit