

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 25 (1934)

Heft: 1

Artikel: Betriebserfahrungen mit statischen Kondensatoren

Autor: Werdenberg, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060129>

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: 17.02.2026

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

Betriebserfahrungen mit statischen Kondensatoren.

Von W. Werdenberg, Kilchberg.

621.319.4 : 621.316.727

Die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich gehören zu den ersten Unternehmungen, welche der Frage der Blindstromkompensierung besondere Aufmerksamkeit widmeten und statische Kondensatoren einführten. Aus ihren dahерigen reichen Betriebserfahrungen und Untersuchungen werden im folgenden Artikel einige sehr interessante Mitteilungen gemacht, wobei besonders auf die Frage des Anschlusses und der Sicherungen, der Grösse, Anordnung und Sicherheit der Entladewiderstände, der Beanspruchung und Konstruktion der Kondensatorschalter, der Verwendung von Autotransformatoren, der Frage der Parallelbetriebe und ihrer Störungen (z. B. Selbsterregungsscheinungen), der Resonanzerscheinungen und der Einflüsse auf Zähler eingegangen wird.

In den letzten Jahren hat der statische Kondensator als Kompensationsmittel überall Eingang gefunden. Bei dessen Anschluss sind die besondern Eigenschaften, die von den Eigenschaften anderer bisher angeschlossener Energieverbraucher wesentlich abweichen, zu berücksichtigen. Insbesondere ist zu beachten, dass die Abschaltung des Kondensators mit ca. 90° Phasenverschiebung geschieht, dass der Kondensator auch nach Abtrennung vom Netz wegen den verbleibenden Ladungen unter Spannung bleibt, dass er ferner zu Resonanzerscheinungen Anlass geben und dass unter Umständen die kapazitive Last die Betriebsverhältnisse von parallel geschalteten Kraftanlagen des Energiebezügers verändern kann.

Einige Erfahrungen und grundsätzliche Untersuchungen der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) über den Anschluss von Kondensatoren dürften daher von allgemeinem Interesse sein. Ueber die Haltbarkeit der Kondensatoren selbst kann mangels Erfahrung heute noch nicht berichtet werden. An den seit wenigen Jahren in Betrieb stehenden Kondensatoren sind bis jetzt nur wenige abnormale Erscheinungen aufgetreten, so dass über die Haltbarkeit noch kein abschliessendes Urteil gefällt werden kann.

1. Direkter Anschluss.

In vielen Fällen, vor allem bei den sogenannten verteilten Kompensationen, wird der Kondensator direkt an einen Energieverbraucher (Motor oder Transformator) angeschlossen (Fig. 1). Man will damit, infolge des Wegfallens besonderer Schalter, die Installationskosten auf ein Minimum reduzieren.

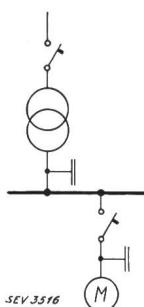


Fig. 1.

Hier hat der Motor- oder Transformatorschalter das Ein- und Ausschalten der Kondensatoren zu übernehmen. Durch dessen Abschaltleistung ist aber die Grösse des zu installierenden Kondensators begrenzt. Bei Schaltern mit Maximalstromauslösern ist ausserdem zu berücksichtigen, dass nach erfolgter Kompensation nicht mehr der gesamte Motorstrom durch den Schalter fliesst, sondern angenähert nur noch dessen Wirkkomponente.

Les Entreprises Electriques du Canton de Zurich sont une des premières qui ont étudié spécialement la question de la compensation de l'énergie réactive et qui ont introduit des condensateurs statiques dans leur réseau. Puisant dans la riche expérience de ces entreprises, l'auteur fait dans l'article ci-dessous des communications intéressantes en particulier sur les problèmes du raccordement et des coupe-circuit, de la grandeur, de la disposition et de la sécurité des résistances de décharge, des sollicitations et de la construction des interrupteurs, de l'utilisation d'autotransformateurs, de la marche en parallèle et de ses perturbations (p. ex. phénomènes d'autoexcitation), de la résonance et de l'influence sur les compteurs.

Sollen also die Motoren in gleichem Grade wie ohne Kondensatoren geschützt werden, so sind diese Schutzeinrichtungen auf entsprechend niedrigere Ansprechströme einzustellen, wobei aber andererseits der durch den Kondensator verursachte Einschalt-Stromstoss nicht zur Auslösung führen darf. Erfahrungsgemäss sollte daher in der Regel nicht über eine Kompensation auf $\cos \varphi = 1$ bei Vollast des hinter dem Schalter angeschlossenen Verbrauchers gegangen werden.

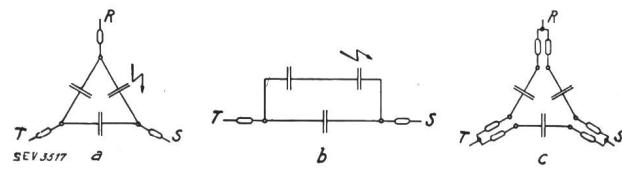


Fig. 2.

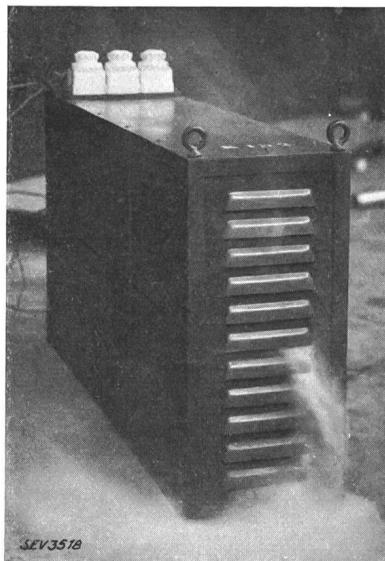
Bei der Abschaltung, z. B. einer Motor-Kondensator-Gruppe, entlädt sich der Kondensator über die Motorwicklung. Da dieser auch weiter kurzgeschlossen bleibt, können sich nach der ersten Entladung auch die sich neu bildenden Restladungen über die Motorwicklung ausgleichen. Dabei darf aber der Kondensator nicht etwa über Sicherungen oder ähnliche Einrichtungen an die Motorklemmen angeschlossen werden, da sonst bei eventuell vorangegangem Durchschmelzen von Sicherungen der Kondensator an seinen Klemmen, trotz Abschaltung, weiter Spannung führt, die unter Umständen dem Menschen gefährlich werden kann, es sei denn, dass jedes Kondensatorelement für sich abgesichert ist oder die Kondensatoren besondere Entladeeinrichtungen besitzen. An dieser Stelle sei noch auf eine Besonderheit der Absicherung von in Dreieck geschalteten Drehstromkondensatoren, die in der Regel gemäss Fig. 2 a ausgeführt wird, aufmerksam gemacht. Schmilzt beispielsweise die Sicherung in der Phase R infolge eines Durchschlages in einem Kondensatorelement, so bleibt, wie Fig. 2b zeigt, das beschädigte Element weiter unter Spannung; der Strom kann aber nur auf 115 % des Normalwertes ansteigen, was nicht genügen wird, um die in den meisten Fällen für grössere Nennströme eingesetzten übrigen Patronen zum Durchbrennen zu bringen. Die Folge ist, dass bei Kondensatoren

ohne Absicherung jedes einzelnen Elementes das beschädigte Element so weit verkohlt oder verbrennt, bis entweder benachbarte Elemente durch die erhöhte Temperatur ebenfalls zerstört werden, oder das schadhafte Element so weit ausbrennt, bis ein Unterbruch entsteht und der Kurzschluss verschwindet.

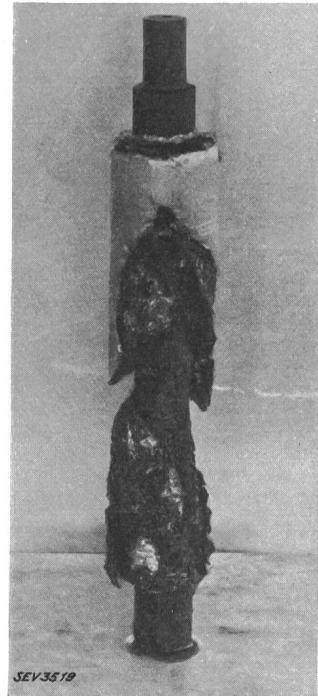
Fig. 3 zeigt einen gemäss Fig. 2 a abgesicherten Kondensator, bei welchem im Betrieb nur eine Sicherung durchbrannte, worauf sich solange brennende Gase entwickelten, bis die Papierisolation und die Metallfolien verbrannten und in dem defekten Element (Fig. 4) ein Unterbruch entstand. Diese Kondensatoren wurden später zur Vermeidung dieser Erscheinung mit Einzelabsicherung der Elemente ausgeführt.

Fig. 5 zeigt einen andern Kondensator, dessen Zerstörung offenbar ebenfalls auf das Durchschmelzen blass einer Sicherung infolge Defektes eines Elementes zurückzuführen ist. Als Ursache wurden zuerst Resonanzerscheinungen vermutet; diese konnten aber trotz eingehenden Messungen nicht festgestellt werden. Die Art der Zerstörung, d. h. das von einem bestimmten Element aus sich nach allen Richtungen steigende Verkohlen der Papierisolation und Verschwinden der Zinnfolie, lässt dagegen mit grosser Sicherheit darauf schliessen, dass das beschädigte Element solange aufgeheizt wurde, bis es zur Zerstörung der Nachbarelemente und zum Ansprechen der übrigen Sicherungen kam. Es

kanten so geändert worden, dass als Stromzuführung nur noch eine Fahne verwendet wird, die bei einem Durchschlag des Elementes ähnlich einer Sicherung abschmilzt.



Oben: Fig. 3.



Rechts: Fig. 4.

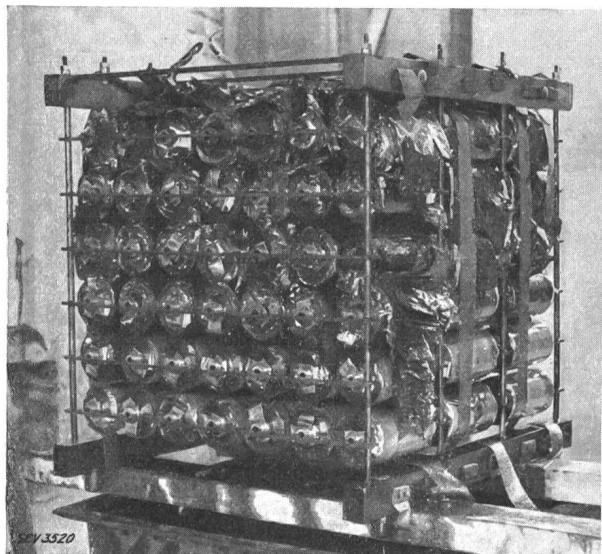


Fig. 5.

ist noch zu bemerken, dass diese Beschädigung an einer Erstausführung von Kondensatoren auftrat, wo die Stromzuführung zum Wickel noch über mehrere starke Fahnen erfolgte. Diese Konstruktion ist aber schon seit längerer Zeit vom Fabri-

Da nicht alle Kondensatorkonstruktionen eine Einzelabsicherung erlauben, könnten diese Kondensatoren als Ausweg nach Fig. 2 c abgesichert werden.

2. Entladewiderstände.

Die Entladewiderstände bestehen in der Regel aus Ohmschen Widerständen, die parallel zu den Kondensatorbelägen geschaltet sind. An sie sind folgende Forderungen zu stellen:

1. Nach Abschaltung des Kondensators soll durch die Widerstände die Spannung an den Klemmen innert nützlicher Frist auf einen für Personen ungefährlichen Wert vermindert werden.
2. Die zusätzlichen Verluste in den Widerständen sollen die Wirtschaftlichkeit der Kondensatorenanlage nicht beeinflussen.
3. Die Widerstände sollen betriebssicher gebaut sein.

Die erste Bedingung verlangt möglichst kleine, die zweite Bedingung dagegen möglichst grosse Widerstände. Um Anhaltspunkte über die zulässige Grösse zu erhalten, wird nachfolgend der Entladevorgang an dem in der Praxis fast ausschliesslich zur Anwendung kommenden Drehstrom-Kondensator untersucht, wo die Entladewiderstände gewöhnlich entweder gemäss Fig. 6 oder Fig. 7 ange schlossen sind.

Mit Rücksicht auf die dritte Forderung ist die Schaltung nach Fig. 7 derjenigen nach Fig. 6 vorzuziehen, da bei einem möglichen Unterbruch bei einem der Widerstände die verbleibenden zwei ge-

sunden Widerstände für die volle Entladung eines Kondensators, allerdings mit einer etwas längeren Entladezeit, immer noch genügen. Es soll daher in folgendem nur der Fall Fig. 7 näher betrachtet werden.

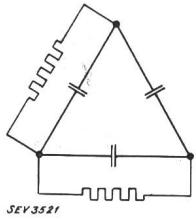


Fig. 6.

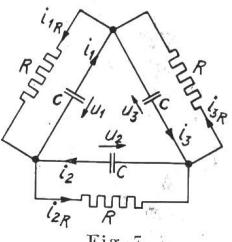


Fig. 7.

Sind die drei Teilkapazitäten und die drei Widerstände unter sich gleich gross, so lautet die Entladegleichung z. B. für den Teilkondensator 1

$$R \cdot C \cdot \frac{du_1}{dt} + e_1 = 0,$$

darin bedeutet

R der Entladewiderstand in Ohm

C die Kapazität eines Teilkondensators in F

u_1 die Spannung am Teilkondensator 1 in V

t die Entladezeit in s.

Für die andern Teilkondensatoren lautet die Gleichung analog, und man erkennt, wie zu erwarten war, dass die Entladung eines Teilkondensators von den Kondensatoren in den andern Phasen nicht beeinflusst wird. Zu Beginn der Entladung ($t = 0$) sei die Spannung am Teilkondensator gleich u_0 ; wenn für C die Blindleistung (Reaktivleistung) P_r des Drehstrom-Kondensators in kVAr bei der verketteten Spannung U in V eingeführt wird, dann ist allgemein die Spannung u nach der Zeit t

$$u = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot P_r}} \cdot \frac{3 \omega U^2}{1000}$$

In der weitern Untersuchung ist nur der für die Entladung ungünstigste Fall zu betrachten. Dieser liegt vor, wenn im Moment der Abschaltung des Kondensators ein Teilkondensator die höchstmögliche Spannung, d. h. den Scheitelwert der verketteten Spannung besitzt. Mit Rücksicht auf die Gefährdung von Personen ist ferner für die maximal zulässige Entladezeit ein möglichst kleiner Wert einzusetzen. Versuche haben gezeigt, dass es in normalen Verhältnissen, z. B. beim Auswechseln von Sicherungen, durchaus möglich ist, ca. 10 Sekunden nach dem Abschalten mit Spannung führenden Teilen der Kondensatoranlage in Berührung zu kommen. In diesem Moment muss also der Kondensator eine ungefährliche Spannung erreicht haben, als welche beispielsweise 36 V betrachtet werden kann¹⁾.

In der Fig. 8 sind unter diesen Voraussetzungen die maximal zulässigen Werte des Entladewiderstandes bei verschiedenen Kondensatorgrößen auf-

¹⁾ Im Entwurf der Leitsätze des SEV wird für Kondensatoren unter 1000 V verlangt, dass die Spannung innerhalb einer Minute auf 50 Volt sinkt; siehe Seite 30.

getragen. Darnach darf z. B. der Entladewiderstand eines 500 V-Kondensators von 50 kVAr Leistung höchstens ca. $15 \cdot 10^3$ Ohm betragen. Nachdem somit der Maximalwiderstand festgestellt worden ist, soll nun untersucht werden, wie gross der Minimalwiderstand im Hinblick auf die Verluste sein darf.

Da in den meisten Fällen die geringen Betriebskosten, d. h. die kleinen Verluste, für die Wirtschaftlichkeit einer Kondensatorenanlage ausschlaggebend sind, dürfen diese Verluste durch die Widerstände nicht wesentlich erhöht werden. Die zusätzlichen Verluste sollten daher stets kleinere Werte als die eigentlichen Kondensatorverluste besitzen. Werden die zusätzlichen Verluste in den Entladewiderständen R mit P_z in Prozenten der Kondensatorleistung P_r bezeichnet, so gilt die Beziehung

$$R \cdot P_r = \frac{100}{P_z} \cdot \frac{3 U^2}{1000}$$

In der Fig. 9 sind für $P_z = 0,15\%$ von P_r die minimal zulässigen Widerstände für verschiedene Spannungen aufgetragen. Vergleicht man Fig. 8 mit Fig. 9, so erkennt man, dass es Spannungen geben muss, von welchen an die Entladung von Kondensatoren über ständig angeschlossene Widerstände nicht mehr wirtschaftlich ist. So sollte beispielsweise bei einem 8000 V - Kondensator von 200 kVAr Leistung der Widerstand mit Rücksicht auf die Sicherheit höchstens $530 \cdot 10^3$ Ohm, mit

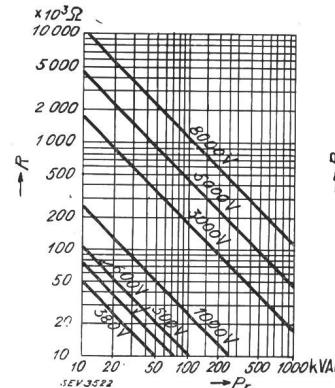


Fig. 8.

Maximal-Widerstand, wenn der Kondensator nach höchstens 10 s eine Spannung von 36 V erreicht haben soll.

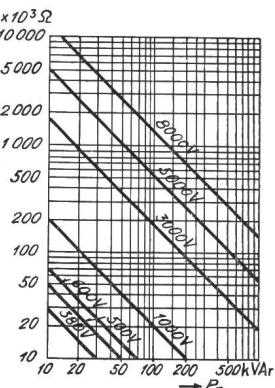


Fig. 9.

Minimal-Widerstand, wenn die dauernden Verluste im Entladewiderstand höchstens 0,15 % betragen sollen.

P_r Drehstrom-Kondensatorleistung.
 R Entladewiderstand.

Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit aber mindestens $630 \cdot 10^3$ Ohm betragen. Die kritischen maximalen Spannungen sind in Fig. 10 für verschiedene Werte der Entladezeit und der zulässigen Verluste in den Widerständen aufgetragen.

Darnach ist die Entladung über dauernd angeschlossene Widerstände nach unsern Annahmen ($t = 10$ s; $u = 36$ V, $P_z = 0,15\%$ von P_r) nur bei Kondensatoren bis zu einer Nennspannung von 3000 V wirtschaftlich durchführbar. Da diese Kurven aber lediglich zeigen sollen, wo ungefähr die

praktischen Grenzen der Anwendung von ständig parallel geschalteten Widerständen liegen, ist in bestimmten Fällen vorher doch noch zu untersuchen, ob nicht durch eine Erhöhung der Dauerverluste eine billigere Entladeeinrichtung als z. B. durch Installation von Spezialschaltern gefunden werden kann.

Die an die Widerstände gestellte dritte Forderung, dass sie betriebssicher gebaut seien, wird von den in der Praxis zur Anwendung kommenden Ausführungen nicht immer erfüllt. Heute sind Silitstäbe die gebräuchlichste Form der Entladewiderstände. Sie sind entweder ausserhalb des Kessels an den Klemmen oder innerhalb des Kessels selbst untergebracht. Oft sind diese Stäbe zu dünn und mit dem Kasten zu starr verbunden, so dass sie, wie die Erfahrung zeigt, leicht zerbrechen.

Aus Metalldrähten gewickelte Widerstände werden selten in Frage kommen, da sie, um betriebs sicher zu sein, aus dicken Drähten hergestellt sein müssen und dadurch die Erstellungskosten gross sind. Dünne Drähte führen leicht zu Unterbrüchen und sind daher zu vermeiden. Auch die Benützung von Spannungsspulen in ohnedies vorhandenen Zählern als Entladewiderstände sollte mit Rücksicht auf die in der Regel bloss zweiphasige Anordnung höchstens als zusätzliche Sicherheitseinrichtung betrachtet werden. Defekte an diesen Spulen gehören nicht zu den Seltenheiten und werden ausserdem erst nach Wochen, wenn eine Zählerablesung vorgenommen wird, bemerkt. Als Entladewiderstände sind auch schon normale, in Serie geschaltete Glühlampen verwendet worden, welche Anordnung ebenfalls betriebssicher gestaltet werden kann. Es ist dabei nur zu beachten, dass die Spannung der Lampen so gewählt wird, dass ihre Lebensdauer praktisch unbegrenzt ist. Ein Defekt an der Einrichtung ist ausserdem leicht erkennbar, da die Lampen in der unterbrochenen Phase dun-

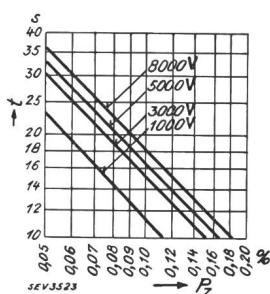


Fig. 10.

Maximal mögliche Entladzeiten und Verluste bei verschiedenen Kondensator-Nennspannungen.
t Entladzeit, nach welcher der Kondensator 36 V erreicht hat.
P_z Dauernde Verluste in den Widerständen in % der Kondensatorleistung *P_c*.

kel bleiben. Eine solche Entladeeinrichtung, pro Phase bestehend aus je vier in Serie geschalteten 220 V-Glühlampen mit 25 W Nennleistung, ist seit drei Jahren an einer im Dauerbetrieb stehenden Kondensatorenbatterie von 100 kVar Leistung für 500 V dauernd angeschlossen, ohne dass bis jetzt Störungen aufgetreten oder Lampenauswechselungen nötig geworden wären. Der Widerstand pro Phase dieser Einrichtung beträgt 7600 Ohm und die gesamten Verluste betragen ca. 100 Watt oder 0,1 %. Die Entladzeit bis zur Erreichung von 36 V beträgt im ungünstigsten Fall ca. 10 s.

3. Der Kondensatorschalter.

Wo der direkte Anschluss nicht möglich ist, werden die Kondensatoren über einen sogenannten Kondensatorschalter an das Netz angeschlossen, der gewöhnlich gemäss dem prinzipiellen Schema Fig. 11 aufgebaut ist.

Beim Einschalten wird der Kondensator zuerst über einen Widerstand, den Ladewiderstand, teilweise aufgeladen und nachher über besondere Kontakte an die volle Netzspannung gelegt. Im ausgeschalteten Zustand wird der Kondensator über Widerstände kurz geschlossen und an Erde gelegt.

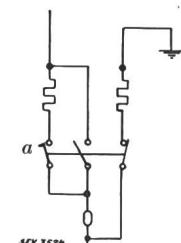


Fig. 11.
a Gleitkontakt

Mit den Ladewiderständen will man erreichen, dass der erste Stromstoss nicht zu gross wird oder dass die beim Laden auftretenden Ueberspannungen am Kondensator ungefährlich bleiben. Diese Ueberströme und Ueberspannungen können aber mit dieser Ladeeinrichtung nicht vollständig beseitigt werden. Wollte man dies erreichen, so müsste der Kondensator über einen stetig von Unendlich bis 0 abnehmenden Widerstand an Spannung gelegt werden. Durch das bloss zweistufige Einschalten können die Ueberströme und Ueberspannungen nur vermindert werden. Wenn man aber bedenkt, dass die entstehenden Ueberströme und Ueberspannungen je nach dem Einschaltmoment ein Vielfaches des normalen Wertes betragen, zudem von den im Leitungszug vorhandenen Impedanzen, also vom Schaltungszustand des Netzes wesentlich abhängen und auch die Schaltgeschwindigkeit von Einfluss ist, so muss die praktische Nützlichkeit dieser zweistufigen Schalter sehr fraglich erscheinen. Die Grösse der Strom- und Spannungsstösse hängt vor allem von der Grösse der Eigenfrequenz ω_e ab, und zwar sind um so grössere Stromstösse zu erwarten, je grösser die Eigenfrequenz des Stromkreises ist, und um so gefährlichere Ueberspannungen werden auftreten, je kleiner die Eigenfrequenz gegenüber der Netzfrequenz ist. Da

aber in den meisten praktischen Fällen $\frac{r^2}{4L^2}$ gegen über $\frac{1}{LC}$ sehr klein ist, so wird die Eigenfrequenz von den Ohmschen Ladewiderständen nicht wesentlich beeinflusst. Ebenso ist die Dämpfung der Amplitude der Eigenschwingung bei den in der Praxis angewendeten Ladewiderständen nur gering.

Tatsächlich haben auch die praktischen Erfahrungen gezeigt, dass ein direktes Zuschalten weder für die Kondensatoren noch für die Schalter schädliche Wirkung hervorbringt. Wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen werden, sind es vielmehr andere Forderungen, die an einen Kondensatorschalter gestellt werden müssen. An dieser Stelle sei aber doch darauf aufmerksam gemacht, dass infolge des Stromstosses oft an den im Zuge der Leitung eingebauten Induktivitäten, wie Stromwand-

lern, Hauptstromrelais usw., Ueberspannungen entstehen können, die manchmal zu Ueberschlägen führen. Diesem Uebelstand kann in den meisten Fällen durch Nebenschluss eines Ohmschen Widerstandes leicht abgeholfen werden.

Gewöhnliche Schalter genügen in der Regel für das Schalten einer der Normalstromstärke des Schalters entsprechenden Kondensatorleistung nicht. Diese Tatsache röhrt einmal daher, dass beim Kondensator ein vollständig phasenverschobener Strom geschaltet werden muss, was z. B. beim Schalten von Motoren nicht der Fall ist. Ferner wurde beobachtet, dass Sicherungen im Kondensatorstromkreis nicht unter Spannung ausgeschaltet werden können, ohne dass sie zum Durchschmelzen kommen. Ein orientierender Versuch in dieser Richtung hat dann gezeigt, dass ein mit einem Lichtbogen in Serie geschalteter Kondensator dauernd ein Vielfaches des Stromes ohne Lichtbogen aufnehmen kann. Da keine geeigneten Versuchseinrichtungen zur Verfügung standen, konnten nur einige angenäherte Werte ohne Berücksichtigung aller beeinflussenden Faktoren gemessen werden. Immerhin zeigte sich, dass die Ueberströme bis auf das Fünffache des Normalwertes steigen und von der Spannung und der Kondensatorleistung unabhängig sind. Die Schalter werden also im Moment des Schaltens mit einem Mehrfachen des Normalwertes beansprucht.

Man wird also den Nennstrom eines Schalters wesentlich höher wählen müssen als den Nennstrom des Kondensators. Bei den Schaltkästen ist es gelungen, den Lichtbogen weitgehend zu vermeiden, indem rasch geschaltet wurde. Dies wurde erreicht durch Einbau einer Schnappvorrichtung, die sowohl beim Ein- als Ausschalten zur Wirkung kommt.

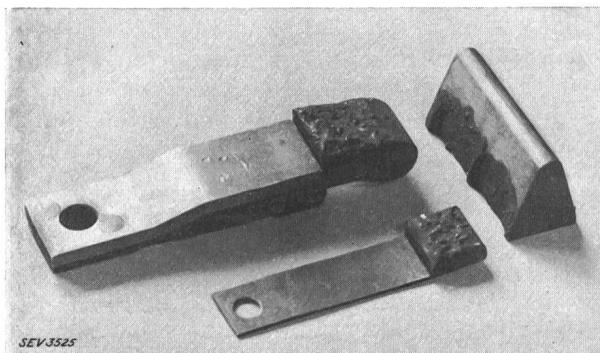


Fig. 12.

So musste beispielsweise ein Schaltkasten von 60 A Nennstrom, der einen 500 V-Kondensator mit 50 A Nennstrom ca. 10mal zu schalten hatte und dessen Kontakte danach vollständig verbrannt waren, gegen einen Schalter mit 120 A Nennstrom ausgetauscht werden, trotzdem der erste Schalter noch mit Ladewiderständen ausgerüstet war. Die nachträglich eingebauten Schaltkästen mit Schnappvorrichtung, ohne Ladewiderstände, konnten we-

sentlich kleiner ausgeführt werden (das Gewicht konnte um ca. 60 % reduziert werden), ohne dass nach 200 Schaltungen der gleichen Leistung wesentliche Veränderungen an den Kontakten festgestellt wurden.

Auch die Oelschalter konnten bedeutend kleiner gewählt werden, sobald der Schalter automatisch und infolgedessen sowohl beim Ein- als Ausschalten rasch betätigt wurde. Fig. 12 zeigt Kontakte

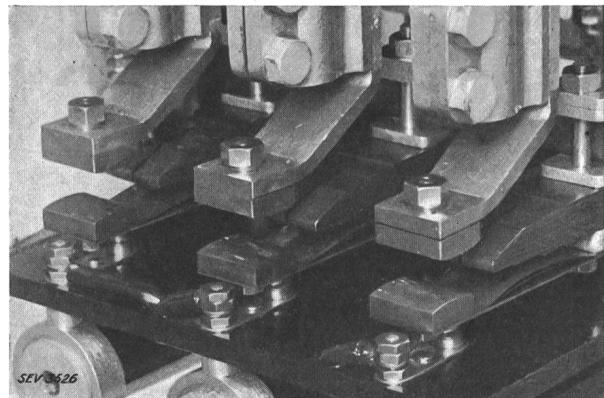


Fig. 13.

eines von Hand zu betätigenden Oelschalters mit Ladewiderständen für 1000 V und 600 A Nennstrom, der eine 600 V-Kondensatorbatterie mit 530 A Normalstrom täglich einmal ein- und auszuschalten hatte, nach ca. 300 Schaltungen. Fig. 13 zeigt dagegen Kontakte eines automatisch betätigten Oelschalters ohne Ladewiderstände für 500 V und 200 A Nennstrom nach ca. 300 Schaltungen eines 145 kVar-Kondensators. Die günstige Wirkung und die Wichtigkeit der raschen Schaltung ist deutlich erkennbar.

Werden im Kondensatorschalter Sicherungen untergebracht, so sind diese so anzuordnen, dass auch bei eventuell durchgeschmolzenen Sicherungen sich der Kondensator entladen kann; d. h. die Entladeeinrichtung muss direkt mit den Kondensatorklemmen verbunden sein (Fig. 11).

4. Kondensatoren hinter Auto-Transformatoren.

In Anlagen mit niedriger Verbraucherspannung werden Kondensatoren oft über einen besondern Transformator, in der Regel einen Auto-Transformer, an das Verbrauchernetz angeschlossen, damit die Kondensatoren mit einer wirtschaftlichen, meistens höhern Spannung betrieben werden können. Wenn nicht geeignete Massnahmen getroffen werden, wird dadurch in die übrige Anlage eine besondere Gefahrenquelle getragen; denn infolge eines Erdschlusses in der Kondensatorenanlage kann das übrige Verbrauchernetz eine höhere Spannung als bei Normalspannung gegenüber Erde annehmen. In § 116 der Hausinstallationsvorschriften des SEV wird daher die Zulassung von Auto-Transformatoren beschränkt. Da aber die Aufstellung eines Autotransformators in manchen Fällen

eine Kondensatorenanlage erst rentabel machen kann, so wurde nach einem Mittel, das die Entstehung von Gefahren durch Spannungserhöhung im Betriebsstromkreis verhütet, gesucht und darin gefunden, dass alle leitenden Anlageteile der Kondensatoranlage, die irgendwie mit Spannung führenden Teilen dieser Anlage in Berührung kommen können, direkt mit dem Nullpunkt des Autotransformators verbunden wurden und ausserdem vor

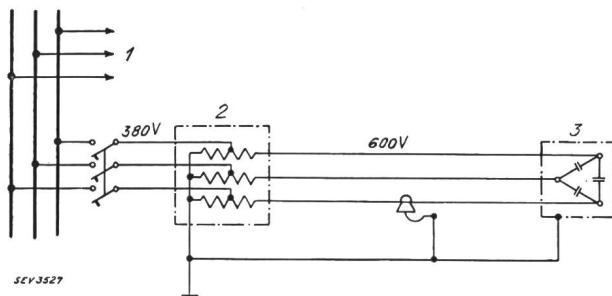


Fig. 14.

Schutzerdung einer Kondensatoranlage mit Autotransformator.
1 Fabriknetz. 2 Autotransformator. 3 Kondensator.

dem Autotransformator eine bei Ueberstrom die Kondensatoranlage abschaltende Einrichtung eingebaut wurde. Fig. 14 zeigt das Schema der ausgeführten Anlage.

Tritt in einer solchen Anlage ein Erdschluss auf, so wird nun, wenn der Erdschlusswiderstand klein ist, ein Ueberstrom entstehen, der den Ueberstromschalter vor dem Autotransformator auslöst. Eine Erhöhung der Berührungsspannung tritt also nicht auf. Ist anderseits der Erdschlusswiderstand so gross, dass der Ueberstromschalter nicht ausgelöst wird, so wird die Berührungsspannung nicht mehr als bei einem gewöhnlichen Erdschluss erhöht.

5. Kondensatoren in Parallelbetrieben.

Bei Energiebezügern, die eigene Primärmotoren in Parallelbetrieb mit dem Energie liefernden Werk arbeiten lassen, können grundsätzlich zwei Arten der Energieabnahme unterschieden werden: eine solche mit Synchrongeneratoren und eine solche, wo Primärmotoren zusammen mit am Netz der Werke angeschlossenen Asynchronmotoren mechanische Leistung abgeben. Die ersten sollen Synchronparallelbetriebe, die zweiten Asynchronparallelbetriebe genannt werden. Bei beiden Betriebsarten können beim Anschluss eines Kompensationsmittels Störungen auftreten, die nachfolgend unter besonderer Berücksichtigung der Aufstellung der Kondensatoren näher beschrieben werden sollen.

Wird ein Synchronparallelbetrieb kompensiert, so gibt meistens ein zu kleiner Generator Anlass dazu, wobei oft noch ein Drehzahlregler und fast immer ein Spannungsschnellregler fehlt. Diese Generatoren arbeiten mit einem zu hohen Leistungsfaktor, der bisweilen nahezu den Wert von $\cos \varphi = 1$ erreicht. In einer solchen Anlage ist nun zu beachten, dass der Generator nie auf den zur Kompensation aufgestellten Kondensator allein arbeiten

kann (z. B. bei Abschaltung der Motoren und des Netzes infolge einer Spannungsschwankung). Denn wäre in diesem Falle der Generator allein durch den Kondensator belastet, so würde der $\cos \varphi$ von 1 auf 0 sinken; die Ankerrückwirkung würde das Erregerfeld unterstützen und die Spannung würde am Generator solange steigen, bis zwischen Primärmotor und abgegebener Wirkleistung Gleichgewicht bestünde, d. h. die Spannung würde unzulässig hohe Werte annehmen. Diese Gefahr kann auf einfache Weise umgangen werden, wenn der Kondensator gemäss Fig. 15 netzseitig des Hauptschalters angeschlossen wird, wodurch automatisch eine Abtrennung der Generatorbelastung auch eine solche des Kondensators zur Folge hat.

Es ist in dieser Zeitschrift²⁾ schon darauf hingewiesen worden, dass beim Asynchronparallelbetrieb der mit dem Asynchronmotor verbundene Kondensator den Motor zu einem Generator machen kann, und besonders der Fall erwähnt worden, wo die werkseitige Speisung des Bezügers unterbrochen wurde. Gleichzeitig sind auch die zu treffenden Schutzmassnahmen angegeben worden.

Es sollen daher nachfolgend nur noch als Ergänzung einige Daten aus Versuchen und ein besonderer Fall des Asynchronparallelbetriebes mitgeteilt werden.

Die Versuche wurden durchgeführt an einem 75 kW-Asynchronmotor, der mit 2 Turbinen von zusammen 100 kW Leistung auf eine gemeinsame Transmission arbeitete. Die Turbinen besaßen keine Regulatoren, da die Drehzahlregelung vom Asynchronmotor übernommen wurde. Die Versuche wurden so durchgeführt, dass bei parallel mit dem Werk arbeitendem Motor der Hauptschalter geöffnet und bei verschiedener Belastung, verschiedener Turbinen- und Kondensatorleistung die sich

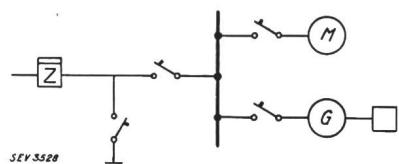


Fig. 15.

nach der Abtrennung einstellende Spannung und Frequenz gemessen wurde. Dabei konnte folgendes festgestellt werden:

- Lief der Motor schon während des Parallelbetriebes motorisch, so war bei getrenntem Betrieb generatorischer Lauf des Motors nicht möglich.
- Wenn die Kondensatorleistung unter einen bestimmten Wert sank (ca. 40 kVAr), so konnte der Motor in getrenntem Betrieb nicht mehr generatorisch arbeiten; die Turbine brannte durch.
- Wurde bei getrenntem Betrieb zum leerlaufenden Asynchronmotor ein geladener Kondensator zugeschaltet, so trat Selbsterregung des Motors ein; er arbeitete generatorisch.

²⁾ Bull. SEV 1933, Nr. 15.

- d) Selbsterregung infolge Remanenz im getrennten Betrieb mit ungeladenen Kondensatoren, wie sie in der ETZ 1922, Seite 155, von G. Huldschiener beschrieben wird, trat bei diesen Versuchen nicht auf.
 - e) Bei jeder Trennung der Betriebe traten Spannungs- und Frequenzänderungen auf, selbst wenn die Belastungen so gewählt wurden, dass Wirkleistung und Blindleistung weder aus dem Netz bezogen, noch zurückgeliefert wurden. Die dabei gemessenen kleinsten bestehen bleibenden Schwankungen betrugen für die Spannung -3% , $+6\%$ und für die Frequenz $-1,3\%$, $+2,6\%$. Anderseits betrugen im stationären Zustand die grössten Abweichungen der Spannung $+80\%$ und die der Frequenz $+42\%$.

Diese Frequenz- und Spannungsänderungen können aber nicht nur für den Besitzer eines solchen kompensierten, asynchronen Parallelbetriebes unangenehm werden, sondern können auch die Werke gefährden, wenn die Trennung zwischen Netz und Parallelbetrieb nicht beim Bezüger, sondern irgendwo im Netz des Werkes geschieht. Ob auch in diesem Fall der Asynchronmotor als Generator weiterlaufen kann, hängt ja nur davon ab, ob die vom Bezüger gelieferte Blind- und Wirkleistung genügt, um in dem mit dem Bezüger verbunden bleibenden Netzteil Gleichgewicht herzustellen. In solchen Anlagen muss daher eine Einrichtung geschaffen werden, die das Auftreten dieser Gefahr verhindert. Dies kann dadurch geschehen, dass der Kondensator mit Hilfe eines Relais abgeschaltet wird, sobald die Spannung im Netz weglebt. Mit Rücksicht auf die unter e) angegebene Erscheinung eignet

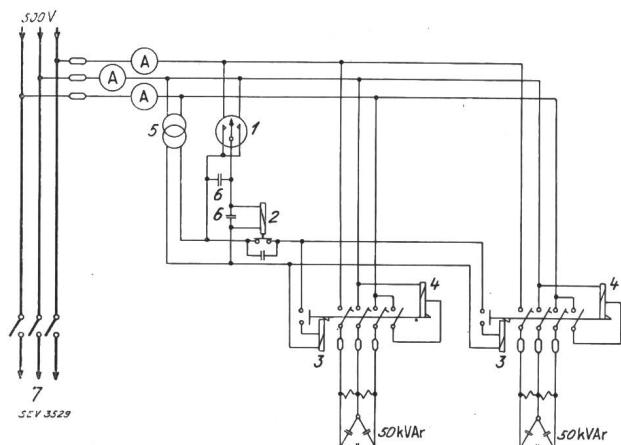


Fig. 16.

Schema eines Asynchronparallelbetriebes.

- 1 Kontaktvoltmeter.
- 2 Zwischenrelais mit Zeitverzögerung.
- 3 Minimalspannungsmagnet.
- 4 Nullspannungsverriegelung.
- 5 Klingeltransformator $515 \pm 5\% / 70$ V.
- 6 Blockkondensator

sich dazu ein Spannungsrelais, das frequenzunabhängig, oder ein Frequenzrelais, das spannungsunabhängig ist. Ausserdem muss am Spannungsrelais die Normalspannung in den Grenzen $\pm 10\%$ der Nennspannung einstellbar und mit einer Zeitver-

zögerung versehen sein, da die Normalspannung sich je nach Schaltungszustand des Netzes verändern kann und kurzzeitige Spannungsschwankungen nicht zur Auslösung führen sollen.

In 4 Anlagen sind bis heute mit gutem Erfolg Kontaktvoltmeter als Schutzrelais eingebaut worden. Dabei wurden die Unempfindlichkeitsgrenzen etwas weiter auseinandergerückt als die unter e)

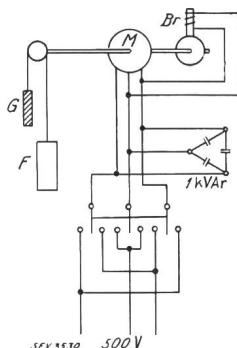


Fig. 17.

Fahrstuhlanlage.

M Motor 4 kW, 1500 U/m.

Br Bremslüftmagnet.

F Fahrstuhl 520 kg

angegebenen Minimalwerte betragen, da es praktisch nie vorkommen wird, dass weder Bezug noch Lieferung von Wirk- oder Blindleistung durch die Werke stattfindet. Fig. 16 zeigt das Schaltungsschema einer solchen ausgeführten Anlage.

Dass asynchrone Parallelbetriebe als solche manchmal schwer erkennbar sein können, möge folgendes Beispiel zeigen (Fig. 17). Ein zum Antrieb eines Warenaufzuges dienender Asynchronmotor von 4 kW Leistung sollte mit einem Kondensator von 1 kVAr Leistung durch direkten Anschluss an die Motorklemmen kompensiert werden. Nach erfolgter Installation sollte der Fahrstuhl zur Probe von einem Mann zum nächst höhern Stockwerk gefahren werden. Dort hielt aber der Fahrstuhl nicht an, sondern fuhr durch, bis er unterm Dachboden anstieß. Anlass dazu gab das Gegengewicht des Aufzuges, das etwas grösser als das Gewicht des Fahrstuhles war. Nach erfolgter Abschaltung des Motors wurde dieser vom Gegengewicht angetrieben. Infolge des Kondensators trat Selbsterregung ein; der Bremslüftmagnet blieb unter Spannung, so dass er nicht mehr abfallen konnte, und der Fahrstuhl wurde durch das Uebergewicht in die Höhe gezogen.

6. Resonanzerscheinungen.

Die Resonanzerscheinungen können in Serieresonanz (Kapazität und Induktivität in Serie) und Parallelresonanz (Kapazität und Induktivität parallel) unterschieden werden. Ferner ist bei beiden Arten sowohl mit der Grundwelle als mit Oberwellen Resonanz möglich.

Von diesen Resonanzen können im Dauerbetrieb nur die Serieresonanzen zu Störungen Anlass geben, da bei Parallelresonanz eine gefährliche Strom- und Spannungserhöhung nicht zu befürchten ist. (Mit der Kompensation wird beispielsweise die Parallelresonanz mit der Grundwelle gerade angestrebt.)

Bei den meisten im Betrieb vorkommenden Resonanzerscheinungen handelt es sich um Serieresonanzen.

nanz mit Harmonischen; sie machen sich durch ein Ansteigen des Stromes wesentlich über den Normalwert bemerkbar. Eine unzulässige Spannungs-erhöhung am Kondensator konnte dagegen nicht festgestellt werden; es ist dies auch zu erwarten, da schon eine schwache Verzerrung der Spannungs-kurve durch eine Harmonische genügt, um bei Resonanz mit dieser Harmonischen deren entsprechenden Strom stark ansteigen zu lassen³⁾. Dieser An-stieg des Stromes zeigt sich in der Praxis in vielen Fällen nur während wenigen Stunden des Betriebes, da er vom Belastungszustand des Netzes abhängt. Durch Vorschalten eines kleinen Widerstandes kann aber das Anwachsen des Stromes verhindert werden.

Versuchsweise wurden auch in einer Anlage, in welcher der Effektivwert des Stromes täglich zwischen 06.00 und 08.00 Uhr und 13.30 und 22 Uhr auf ca. 170 % des Nennstromes stieg, keine solchen Widerstände eingebaut. Trotzdem haben die seit 2 Jahren im Betrieb stehenden Kondensatoren zu keinen Störungen geführt.

Die Gefahr der Resonanz mit der Grundwelle trat bis heute nur in einem Falle auf, und zwar an Hochspannungsleitungen, die, wenn sie infolge einer Störung automatisch ausgeschaltet worden waren, versuchsweise über eine sogenannte Prüfdrossel-spule wieder unter Spannung gesetzt wurden. Diese in der Hauptsache nur aus induktivem Widerstand bestehende Drosselpule kann mit den an der betreffenden Leitung angeschlossenen Kondensatoren einen Schwingungskreis bilden, der bei der Grundfrequenz von 50 Per./s zur Serieresonanz führt. Eine von den EKZ vor dem Einbau von Kondensatoren vorgenommene theoretische Untersuchung und teilweise auch praktische Versuche haben gezeigt, dass mit dieser Gefahr für in der Praxis vor kommende Kondensatorgrößen durchaus zu rechnen ist. Die Drosselpulen wurden daraufhin ausgebaut und durch Ohmsche Widerstände ersetzt. — Da wohl an manchen Orten, wo mit Kondensatoren der Leistungsfaktor verbessert werden soll, heute noch Prüfdrosselpulen eingebaut sind, soll nachfolgend kurz der Weg zur Berechnung der zu erwartenden Ueberspannungen an Drosselpule und Kondensator angegeben werden.

Die zu prüfende Drehstrom-Leitung ist durch das Ersatz-Schema Fig. 18 dargestellt. Darin bedeutet U die verkettete Spannung, P_r die Nennleistung des Kondensators, $\omega\lambda$ und r den induktiven bzw. Ohm-schen Widerstand der Leitung einschliesslich Drosselpule und Z_B und φ_B die Belastungsimpedanz bzw. Phasenverschiebung der Leitung ohne Kondensator. Ferner sei Z die Gesamtmpedanz des Stromkreises. Da infolge der Eisen enthaltenden Drosselpule λ mit der Spannung ändert, kann die Spannung am Kondensator oder an der Drosselpule nicht in Funktion von P_r aufgetragen werden. Die Blindleistung P_r ist daher in Funktion der Gesamt-impedanz darzustellen. λ lässt sich ebenfalls in Funktion der Gesamtmpedanz auftragen, da ge-

wöhnlich der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an der Drosselpule bekannt und U konstant ist. Eine genaue Durchrechnung zeigt, dass der Widerstand r vernachlässigt und Z_B als von der Spannung unabhängig angenommen werden darf, da

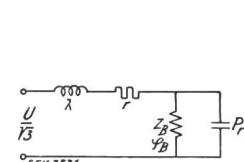
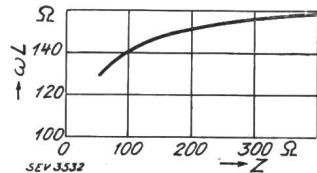


Fig. 18.

Fig. 19.
Charakteristik der Drossel-spule.

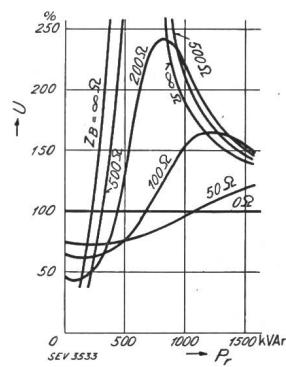
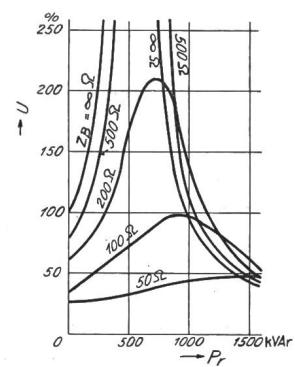
in diesem Falle die tatsächliche Resonanz nicht von grosser Bedeutung ist, sondern vielmehr schon Spannungserhöhungen von nur ca. 20 % der Normalspannung für den Betrieb wichtig sind. Unter diesen Voraussetzungen gilt die Beziehung

$$P_r = U^2.$$

$$\left\{ -\frac{\omega\lambda}{Z^2 - \omega^2\lambda^2} + \frac{\sin\varphi_B}{Z_B} \pm \sqrt{\frac{Z^2}{(Z^2 - \omega^2\lambda^2)^2} - \frac{\cos^2\varphi_B}{Z_B^2}} \right\}$$

In den Fig. 20 und 21 sind mit Hilfe dieser Gleichung die am Kondensator und an der Drosselpule, mit der Charakteristik gemäss Fig. 19, auftretenden Spannungen aufgetragen. Dazu wurden φ_B und Z_B beliebig gewählt, verschiedene zusammengehörende Werte von U und Z eingesetzt und daraus P_r berechnet. Die Kurven zeigen, dass Spannungserhöhungen an der Drosselpule schon bei Blindleistungen von ca. 200 kVAr und am Kondensator noch früher auftreten können.

Versuche an einer Leitung haben diese Resultate bestätigt. Das Beispiel zeigt auch die bekannte Tatsache, dass bei einer Ueberspannung an der Drossel-

Fig. 20.
Spannung an der Drossel-pule bei $\cos\varphi_B = 0,7$.Fig. 21.
Spannung am Kondensator, bzw. Netz, bei $\cos\varphi_B = 0,7$.

spule oder im Netz nicht notwendigerweise auch eine solche im Netz bzw. an der Drosselpule auf-treten muss, dass aber beim Prüfen von Leitungen mit Drosselpulen mit dem Entstehen von Ueber-spannungen, selbst bei grossen Belastungen, stets zu rechnen ist.

7. Einfluss auf Zähler.

Die Angaben von Zählern können durch dahinter aufgestellte Kondensatoren beeinflusst und we sentlich gefälscht werden. Die oft vermutete Beein-

³⁾ Bull. SEV 1929, S. 658, Fig. 5.

flussung durch Kurvenverzerrung konnte aber bis heute weder in Versuchen noch in der Praxis festgestellt werden⁴⁾; dagegen zeigten sich wesentliche

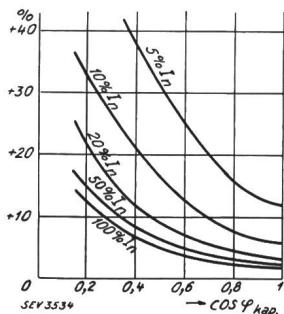


Fig. 22.
Fehler in % des Sollwertes
eines Wirkenergiezählers
 $3 \cdot 20 \text{ A}; 3 \cdot 500 \text{ V}$.

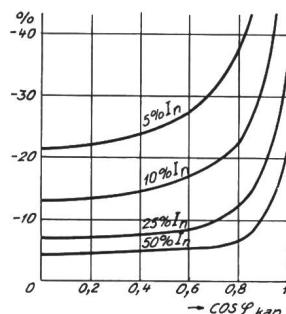


Fig. 23.
Fehler in % des Sollwertes
eines Blindenergiezählers
 $3 \cdot 5 \text{ A}; 3 \cdot 500 \text{ V}$.

Fehler an den Wirkenergiezählern bei kapazitivem Bezug. Fig. 22 zeigt die an einem Kilowattstundenzähler für $3 \cdot 500 \text{ V}$ und $3 \cdot 20 \text{ A}$ aufgenommenen Fehlerkurven. Danach können Fehler bis zu ca. 40 %

⁴⁾ Siehe Hürbin, Bull. SEV 1929, S. 669.

auftreten, sobald die Wirkbelastung relativ zum Sollwert klein ist. Dies wird aber in der Regel der Fall sein, da Anlagen nicht von vornherein überkompensiert werden. Tritt die kapazitive Belastung nur kurzzeitig auf, so wird sich der Fehler an der Stromrechnung allerdings nicht in diesem Masse auswirken. Bei Bezügern aber, die ständig mit kapazitiver Last arbeiten, z. B. infolge Stillegung eines Teils des Betriebes, ist eine einwandfreie Messung der verbrauchten Energie nicht mehr möglich. In diesem Falle müssen entweder besonders geeichte Zähler eingebaut, oder auch ein Teil der Kompressionsmittel abgeschaltet werden.

Ein Einfluss eines voreilenden Leistungsfaktors auf die Blindenergiezähler ist nur dort vorhanden, wo die Zähler nicht mit Rücklaufhemmung ausgeführt sind und also bei kapazitiver Last nicht still stehen. Fig. 23 zeigt die an einem Blindenergiezähler für $3 \cdot 5 \text{ A}$ und $3 \cdot 500 \text{ V}$ bei Rückwärtsgang festgestellten Fehlerkurven. Danach können auch hier grosse Fehler auftreten, so dass es angezeigt ist, Lieferung und Bezug von Blindenergie getrennt zu messen.

Neue Erkenntnisse über den Abschaltvorgang in Wechselstromschaltern und ihre Anwendung auf den Bau des Oelstrahlschalters für Höchstspannung.

Von Dr. A. Roth, Aarau.

621.316.57.064.25

Es werden die Erscheinungen beim Abschalten eines Wechselstromlichtbogens analysiert und gezeigt, wie ihre richtige Betrachtung und Ausnutzung zu einer Schalterkonstruktion mit sehr bemerkenswerten Eigenschaften führt. Der neue Schalter, ein «Oelstrahlschalter», wird beschrieben und dem klassischen Oelschalter gegenübergestellt.

L'auteur analyse les phénomènes accompagnant la rupture d'un arc alternatif et montre comment leur étude et leur application correctes ont conduit à une construction d'interrupteur présentant des qualités remarquables. Une description de l'interrupteur «à jet d'huile» est suivie d'une comparaison avec le type classique d'interrupteur à huile.

Es darf wohl behauptet werden, dass die modernen Oelschalter, besonders für Höchstspannungsanlagen, einen grossen Stand der Vollkommenheit erreicht haben und mit grosser Sicherheit arbeiten. Eine nähere Betrachtung zeigt indessen eine Reihe von Punkten praktischer Art, welche zu Kritik Anlass geben könnten. So fragt man sich, ob es wirklich nötig ist, dass zum Beispiel 150 kV-Schalter so grosses Oelvolumen (ungefähr 4600 l pro Pol), so grosses Gewicht (mit Oel ungefähr 7000 kg pro Pol), so grosse Energieentwicklung (8000 kilojoules pro Pol für 600 MVA) und so grosse Gasentwicklung (1500 l pro Pol bei Abschaltung von 600 MVA) und die dahierige ausserordentlich grosse Druckbeanspruchung, grosse bewegte Massen und folglich lange Abschaltzeiten (0,40 s) aufweisen müssen.

Verschiedene europäische Firmen haben, von diesen Ueberlegungen ausgehend, neue Lösungen gesucht und auch gefunden¹⁾. Die Möglichkeit dazu ist gegeben durch genauere Erfassung des Löschvorganges. Aus dieser folgt vor allem, dass die heutigen Schalter grosse Lichtbogenlängen aufwei-

sen, welche wohl zur Energieentwicklung, aber nur zum kleinen Teile zur Löschung beitragen.

Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen soll auf einige bekannte Tatsachen zurückgegriffen werden:

1. Die Löschung erfolgt in allen bekannten Wechselstromschaltern im Augenblicke des natürlichen Nulldurchgangs des Stromes, und zwar dem ersten, welcher stattfindet, nachdem eine bestimmte, durch den Abschaltstrom, die im Abschaltmoment bestehende Netzspannung und die Eigenfrequenz des Stromkreises einerseits, durch die Schalterkonstruktion andererseits gegebene Länge des Lichtbogens erreicht ist.

2. Im natürlichen Nulldurchgang des Stromes ist der Lichtbogen kein eigentlicher Lichtbogen mehr, da ja der Strom $i = 0$ ist, also keine Elektrizität transportiert wird. In diesem Augenblicke ist der «Lichtbogen» nur noch eine viele tausend Grad heiße Gassstrecke, welche Ionen und Elektronen in grosser Zahl enthält. In diesem Augenblicke ist auch die Spannung gleich 0, steigt aber bei kleinem $\cos \varphi$ des Kurzschlusskreises — und nur ein solcher kommt bei schweren Abschaltungen in Frage — in kürzester Zeit auf den Amplitudenwert

¹⁾ Vgl. z. B. Bull. SEV 1932, Nr. 22 und 23.