

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 21 (1930)
Heft: 20

Artikel: Statische Kondensatoren als Phasenkompensatoren
Autor: Imhof, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061333>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

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

XXI. Jahrgang
XXI^e Année

Bulletin No. 20

Oktober II 1930
Octobre II 1930

Statische Kondensatoren als Phasenkompensatoren.

Von Prof. A. Imhof, Zürich-Altstetten.

621.319.42 : 621.316.727

Der Autor macht Angaben über den konstruktiven Aufbau von industriellen Kondensatoren und Kondensatorbatterien für elektrostatische Blindleistungskompensation und beschreibt sieben ausgeführte Anlagen. Dann sucht er die Grenzen der Wirtschaftlichkeit derartiger Anlagen zu bestimmen und zeigt an einem Rechenbeispiel, dass im allgemeinen die $\cos \varphi$ -Verbesserung bei den heutigen Preisen wesentliche Ersparnisse an Stromkosten zur Folge hat, wobei die statische Phasenkompensation gegenüber derjenigen mit rotierenden Umformern bis zu Leistungen über 1000 BkW beträchtlich wirtschaftlicher sein kann. Ferner werden Angaben über Raum- und Bodenbedarf der Kondensatoranlagen gemacht und die Aussichten zu deren Verkleinerung diskutiert. Zum Schluss streift der Autor Fragen über Zubehörapparate wie Schalter, Ueberstromschutz, Entladewiderstände und Messgeräte.

L'auteur renseigne sur la construction de condensateurs et de batteries de condensateurs industriels pour la compensation électrostatique de la puissance réactive, puis décrit des installations terminées. Il cherche ensuite à déterminer les limites dans lesquelles ces installations demeurent économiques et montre par un exemple numérique qu'en général, avec les prix actuels, l'amélioration du $\cos \varphi$ entraîne une économie sensible des frais de courant, l'avantage de la compensation statique sur l'emploi des convertisseurs rotatifs pouvant être considérable jusqu'à des puissances dépassant 1000 kVA. Suivent des indications sur la surface et le volume des installations de condensateurs et sur les perspectives de réduction d'encombrement. L'auteur esquisse en terminant des questions relatives aux accessoires, interrupteurs, protection contre les surintensités, résistances de décharge et appareils de mesure.

1. Allgemeines.

Seit etwa zwei Jahren wird der Verbesserung des Leistungsfaktors elektrischer Anlagen nun auch in Europa weitgehendes Interesse entgegengebracht. Die Elektrizitätswerke beginnen immer allgemeiner, energische Massnahmen hiefür zu ergreifen, sei es durch Aufstellung eigener Kompensatoren, durch geeignete Tarifmassnahmen, oder durch Vorschriften über minimal zulässige Leistungsfaktoren. Ueber die Zweckmässigkeit, ja oft unbedingte Notwendigkeit der Kompensation wollen wir uns hier nicht auslassen, da hierüber schon viel diskutiert worden ist und wohl nahezu Einstimmigkeit besteht.

Unter den zahlreichen Methoden der Phasenkompensation ist in neuester Zeit die elektrostatische Kompensation zu grösserer Beachtung gelangt und soll im folgenden einigen Betrachtungen unterworfen werden. Sie ermöglicht in den äussersten Zweigen der Netze zu kompensieren und hiedurch nicht bloss die Hauptzüge, sondern auch die feineren Verästelungen der Netze vom Blindstrom zu entlasten.

2. Konstruktive Angaben.

Jeder Kondensator besteht aus zwei durch ein Dielektrikum getrennten leitenden Flächen. Die Kapazität ist proportional der Elektrodenfläche und der Dielektrizitätskonstanten des Dielektrikums, umgekehrt proportional der Dicke des Dielektrikums. Die Dicke des Dielektrikums kann nicht beliebig herabgesetzt werden, sondern sie ist durch die nötige elektrische Festigkeit innerhalb gewisser Grenzen gegeben. Wirtschaftliche Kondensatoren waren erst möglich, seitdem es gelungen ist, ein Isoliermaterial zu finden, das sich in dünnen Schichten gleichmässig herstellen lässt und das eine sehr hohe Durchschlagsfestigkeit aufweist. Da technische Kondensatoren, um Raum zu sparen, eine Uebereinanderlagerung vieler Einzelkondensatoren erfordern, entstehen Körper verhältnismässig kleiner Oberfläche, so dass eine genügende Wärmeableitung nur bei kleinen dielektrischen Verlusten möglich ist. Die Forderung kleiner Verluste ist auch im Interesse einer hohen Wirtschaftlichkeit der statischen Phasenkompensation wesentlich.

Als allgemein angewandtes Dielektrikum haben sich Spezialpapiere bewährt, die in trockenem Zustande mit hoch raffiniertem Oel oder mit einer leicht schmelzbaren Masse imprägniert werden. Bei Schichtdicken in der Grössenordnung eines Zehntel-Millimeters werden Durchschlagsfestigkeiten von 2 000 000 V/cm bis 2 500 000 V/cm erreicht. Die Tangenten der niedrigsten Verlustwinkel $\left(\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{Verlustleistung}}{\text{Kapazitive Leistung}} \right)$ betragen bei 20° etwa $\operatorname{tg} \varphi = 0,003$ bis 0,004. Sie wachsen mit steigender Temperatur.

Von wesentlicher praktischer Bedeutung ist die Formgebung und Typisierung der Kondensatoren. Als begleitend bei den Entwicklungsarbeiten erachten wir folgende Gesichtspunkte:

1. Kurze Montagezeiten, um die Kondensatorrollen nicht lange der Luft auszusetzen;
2. Anpassungsfähigkeit an die geforderte Leistung und Spannung;
3. Möglichkeit einer weitgehenden Unterteilung der Gesamtleistung und der Erweiterung;
4. Anpassungsfähigkeit an den verfügbaren Raum, Rücksichtnahme auf bestehende Zugänge und Türen;
5. Da Kondensatoren oft in bestehende Anlagen eingebaut werden, wo keine besonderen Transportmittel hierfür vorgesehen sind, ist auf leichten Transport Bedacht zu nehmen. Man trachtete, möglichst ohne schwere Transportmittel auszukommen;
6. Unterbringung grosser Blindleistungen in kleinem Raum bei Wahrung der Kühlflächen;
7. Gute Kontrollmöglichkeit;
8. Lokalisierung eventueller Störungen; Behebung ohne Stilllegung des Betriebes.

Aus diesen Forderungen ergibt sich, dass es nicht nötig ist, äusserlich den Transformator nachzuahmen, sondern dass grosse Leistungen durch Bildung von Batterien aus einer Mehrzahl kleinerer Kondensatoreinheiten gebildet werden sollen. Wie weit man in der Unterteilung der Kastengrössen gehen soll, ist eine Frage der Preiskalkulation. Je feiner die Unterteilung, desto grösser ist die Zahl der Durchführungsisolatoren und desto mehr Kastenbaumaterial ist nötig. Aeussere Stromleitungen sind erheblich teurer als solche im Innern der Kondensatorkasten, so dass auch dieser Punkt gegen eine zu weitgehende Unterteilung spricht. Andererseits bietet der Bau zahlreicher gleicher Kondensatortypen von mässiger Grösse für eine serienmässige, laufende Fabrikation bedeutende Vorteile, wie auch die Vermeidung schwerer Gewichte. Durch geeignete Disposition der Batterie kann die äussere Leitungsführung sehr einfach und damit wenig vertuernd gestaltet werden.

Sehr zugunsten der Batterien gegenüber grossen Kesseleinheiten spricht die Lokalisierung von Störungen, deren leichte Auffindbarkeit und die Revisionsmöglichkeit ohne Beeinträchtigung des Betriebes.

Im folgenden Abschnitt soll gezeigt werden, wie die oben diskutierten Gesichtspunkte in die Praxis umgesetzt worden sind. Wir halten uns dabei an Anlagen, die durch die Micafil A.-G. gebaut worden sind.

Das Dielektrikum der Micafil-Kondensatoren besteht aus einigen Lagen eines Spezialpapieres, das mit reinem Oel durchtränkt ist. Die einzelnen Kondensatorelemente haben die Form von Rollen, welche aus dem Isolierpapier und Metallbelägen gewickelt sind. An den beiden Frontseiten der Rollen sind die Metallbeläge ausserhalb des Dielektrikums mit zuverlässigen Anschlussarmaturen versehen. Solche Rollen sind zu mehreren in Blechkessel eingebaut, die mit reinstem Oel gefüllt und nach im Vakuum erfolgter peinlicher Entlüftung hermetisch geschlossen werden. Die Blindleistung pro Rolle beträgt je nach Fabrikat bis 1 BkW.

Je nach Höhe der Spannung erweisen sich verschiedene Formgebungen als zweckmässig. Bei niedrigen Spannungen können leicht mehrstöckige Kondensatorengestelle mit einmontierten Verbindungsleitungen angewandt werden. Bei Hochspannung muss jedoch der Leitungsführung wegen im allgemeinen hievon Umgang genommen werden.

3. Beispiele ausgeführter Anlagen.

Die Beispiele wurden auf Anlagen verschiedener Betriebsspannungen und Leistungen, wie auch verschiedener Betriebs- und Aufstellungsbedingungen ausgedehnt, um in vielseitiger Weise die Anwendung der statischen Kompensation zu illustrieren.

a) Mechanische Seidenstoffweberei Winterthur.

Infolge des weitgehenden Einzelantriebes der Webstühle sind zahlreiche kleine Drehstrom-Induktionsmotoren von je 0,3 bis 0,6 kW Leistung vorhanden. Der Leistungsfaktor war naturgemäss niedrig, er betrug durchschnittlich wenig über 0,6. Infolge der nach und nach durchgeführten Betriebserweiterungen wurde der Transformator, der die Spannung von 3000 auf 500 V heruntersetzt, schliesslich überlastet. Für einen zweiten Transformator fehlte der nötige Raum. Da ferner tarifliche Massnahmen zur Begünstigung eines hohen Leistungsfaktors in Aussicht stehen, erschien die Anwendung von Kondensatoren zur Verkleinerung der Stromstärke zweckmässig. Die Spannung von 500 V ist für die Wirtschaftlichkeit von Kondensatoren günstig. Die Einzelkompensation der sehr zahlreichen Motoren wäre umständlich und teuer gewesen; für eine ganz zentrale Kompensation fehlte der Raum und zudem war eine Entlastung der Kabel, welche vom Transformator zu den Motorgruppen führen, erwünscht. Die 7 Gruppen, bestehend aus je 22 bis 44 Webstühlen, wurden deshalb durch je einen Normal-kondensator kompensiert. Letztere konnten in nächster Nähe der Gruppen-Schalttafeln je auf eine kleine Wandkonsole gestellt werden, so dass sie den Raum in keiner Weise beeinträchtigen (Fig. 1.) Jeder Gruppenkondensator wurde durch einen gewöhnlichen Handumschalter abschaltbar gemacht. Nach Abschaltung vom Netz wird über je zwei Silitwiderstände von 10 mm Durchmesser und 100 mm Länge auf

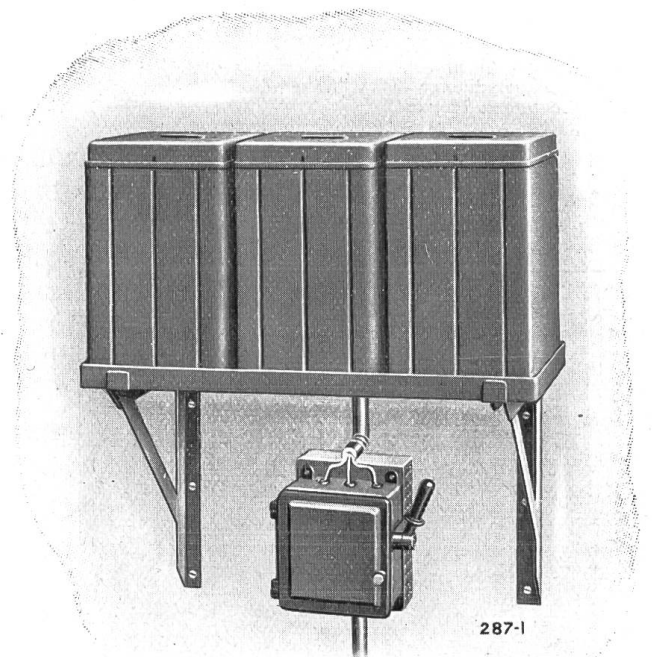


Fig. 1.
Kondensatorbatterien auf Wandkonsole.

Erde entladen, um jede Berührungsfahr auszuschliessen. Die kapazitive Blindleistung der ganzen Anlage beträgt 55 BkW. Die vom Transformator aufgenommene Stromstärke sank von 240 A auf ca. 165 A, wodurch der vorgesehene Zweck erfüllt war. Messungen des stromliefernden Werkes haben ergeben, dass jährlich lediglich infolge verkleinerter Kupferverluste in Transformator und Leitungen ca. Fr. 500.— gespart werden.

b) Anlage der Giesserei Bern.

Das E. W. Bern hat in fortschrittlicher Weise energische Massnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors ergriffen. In der Giesserei Bern war die Spannung nur 200 V, so dass die direkte statische Kompensation zu teuer geworden wäre. Die dort erstellte Anlage ist ein gutes Beispiel für eine Kondensatorbatterie mit vorgeschaltetem Autotransformator, 200/500 V. Die gesamte kapazitive Blindleistung beträgt 125 BkW und wurde in drei einzeln abschaltbare, gleiche Teilleistungen

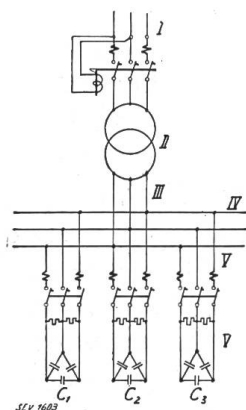


Fig. 2.

Schaltschema der Kondensatorenanlage
in der Giesserei Bern.

- I Zuleitung 200 V, 200 mm².
- II Transformator 200/500 V.
- III Leitung 60 mm².
- IV Sammelschienen 500 V, 60 mm².
- V Leitungen 16 mm².
- C₁, C₂, C₃, Dreiphasige Kondensatorbatterien.

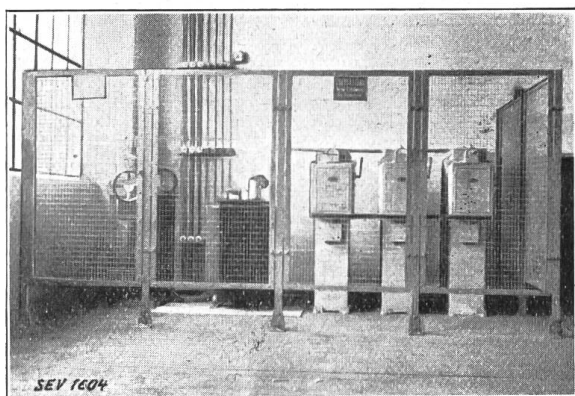


Fig. 3.

Kondensatorenanlage in der Giesserei Bern.
125 BkW, 200/500 V, 50 Per/s.

unterteilt. Transformator, Schaltapparate und die Kondensatorengestelle wurden so dimensioniert, dass eine eventuell spätere Leistungserhöhung auf 150 BkW möglich ist. Fig. 2 zeigt das Schaltschema, Fig. 3 ein Bild der Anlage. Der Oelschalter vor dem Transformator ist mit automatischer Ueberstrom- und Nullspannungsauslösung versehen, die drei Kondensatorschalter besitzen Ueberstromauslösung. Es sind im übrigen normale Schaltkasten, in welche je ein Silitwiderstandsstab eingebaut ist, der die mittlere Phase mit den äusseren Phasen verbindet. Die Kondensatoren werden hiedurch nach der Abschaltung innert kurzer Zeit entladen. Der Leistungsverbrauch der Widerstände ist vernachlässigbar klein; er beträgt ca. 0,2 % der kapazitiven Kondensatorenleistung.

Der raue Betrieb einer Giesserei und Konstruktionswerkstätte, weiterhin der in Fabrikationshallen selten überschüssige Raum und der unregelmässige Leistungsbedarf verschiedener Antriebe, hätte eine individuelle Kompensation der einzelnen Motoren nicht als zweckdienlich erscheinen lassen.

c) Anlage Dietikon der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E.K.Z.).

Die E.K.Z. haben weitgehende Anordnungen zur Verbesserung des Leistungsfaktors in ihren Anlagen getroffen und hiezu mehrfach von der statischen Kompensation Gebrauch gemacht. In Dietikon wurde durch die

E.K.Z. neben dem alten dortigen kleinen Kraftwerk eine für die weitere Umgebung bestimmte Zentral-Kompensationsstation mit einer Gesamtleistung von 1000 BkW errichtet, wobei zwei verschiedene Fabrikate je zur Hälfte angewandt wurden.

Die Spannung wird von 8000 V auf 600 V herabgesetzt. Die Kondensatoren der Micafil sind für Teilleistungen von je 10,5 BkW gebaut. Je 12 solcher Kondensatoren bilden eine Batterie von 125 BkW (Fig. 4.) Je zwei solche Batterien sind über einen Oelschalter (Carl Maier) an den Transformator angeschlossen. Die Oelschalter besitzen einen Einschaltwiderstand von ca. 1,5 Ohm, um den Einschaltstromstoss zu vermindern, ferner einen im ausgeschalteten Zustand angeschlossenen Entladewiderstand.

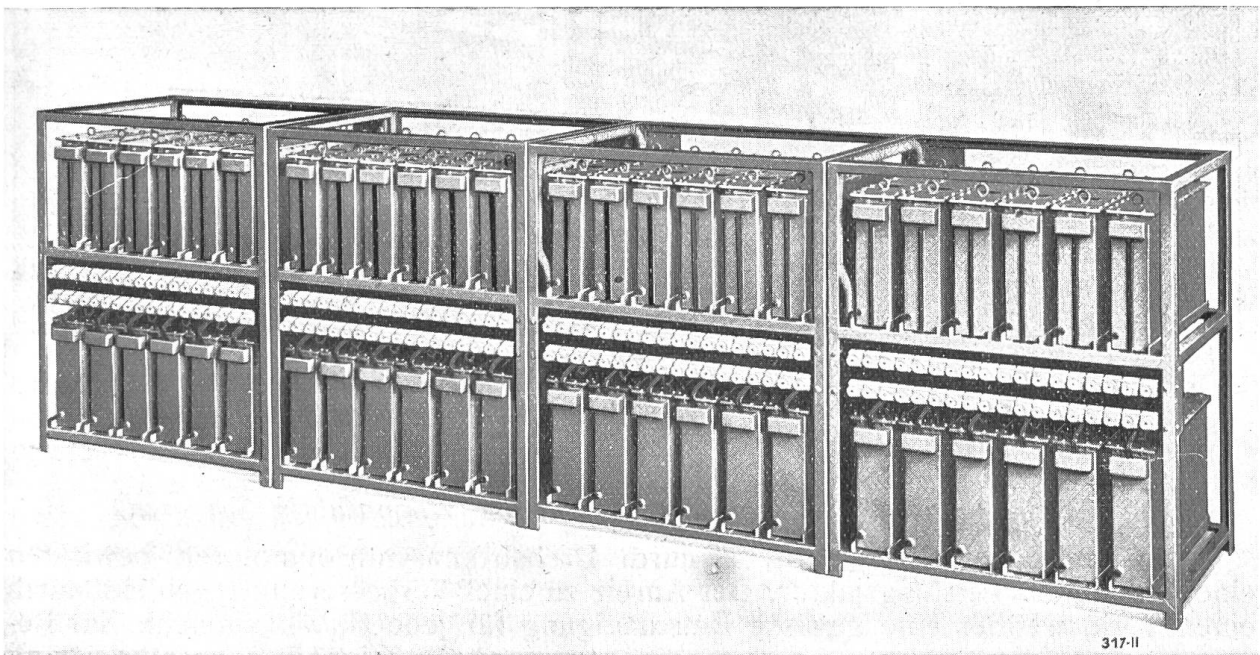


Fig. 4.
Kondensatoren in der Anlage Dietikon.

Jeder Kondensator ist einzeln abgesichert (20 A Diazed). Die Sicherungen sind, wie Fig. 4 zeigt, übersichtlich auf einer in halber Gestellhöhe angebrachten Tafel vom Bedienungsraum aus zugänglich. Die gewählte Gestell- und Kastenbauweise ist für die Kühlung günstig, ist übersichtlich und ergibt eine einfache Führung der Sammelleitungen. Die Aufstellung des Transformators, der Schalter und Kondensatoren erfolgte in einem kleinen Wellblechbau, in welchem während heissen Sommertagen Raumtemperaturen bis 38°C gemessen werden.

d) Anlage Grüningen der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E.K.Z.).

Diese Anlage (Fig. 5) hat den Zweck, den Leistungsfaktor für die umliegende Gegend zu verbessern. Hier wurden Teilkondensatoren zu 25 BkW angewandt, die zu je vier in Gestelle zu 100 BkW eingebaut sind; sie sind wiederum einzeln abgesichert. Die Gesamtleistung der 1000 BkW-Batterie ist in zwei einzeln schaltbare Teilleistungen unterteilt. Die beiden Oelschalter besitzen Einschalt- (ca. 1,5 Ohm) und -Entladewiderstände, sind jedoch nicht automatisch, in Anbetracht der fein gesicherten Kondensatoren. Die Spannung wird von 8000 V durch einen der Kondensatorbatterie vorgeschalteten Transformator auf 600 V heruntergesetzt.

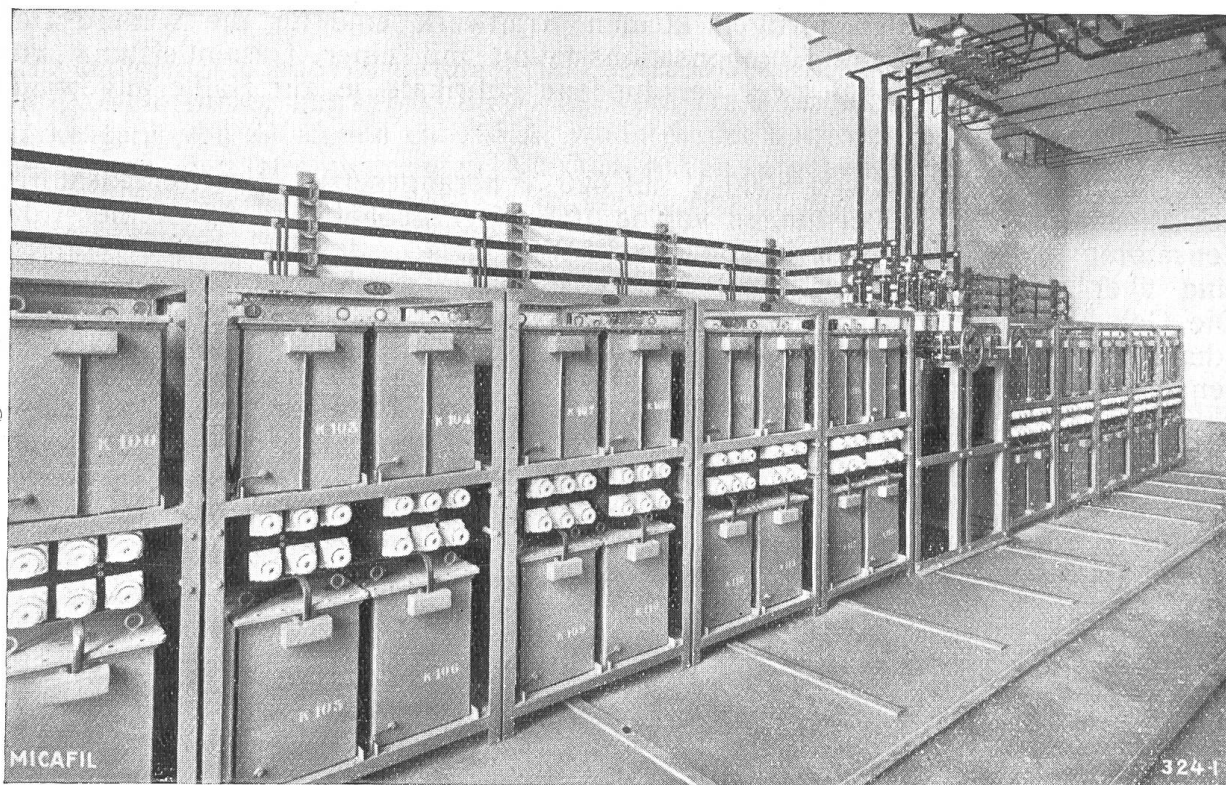


Fig. 5.

Kondensatoranlage Grüningen. 1000 BkW, 600 V, 50 Per/s.

e) Anlage in der Transformatorstation der Wagonfabrik Schlieren.

Die zahlreichen Einzelantriebe durch Drehstromasynchronmotoren bewirkten einen schlechten Leistungsfaktor. Der Anreiz zu einer Verbesserung ergab sich durch einen Tarif, welcher eine gewisse Entschädigung für jede BkWh vorsieht. Zur Bestimmung der nötigen Kondensatorleistung und Leistungsverteilung wurden Blindleistungsdiagramme verwendet (Fig. 6).

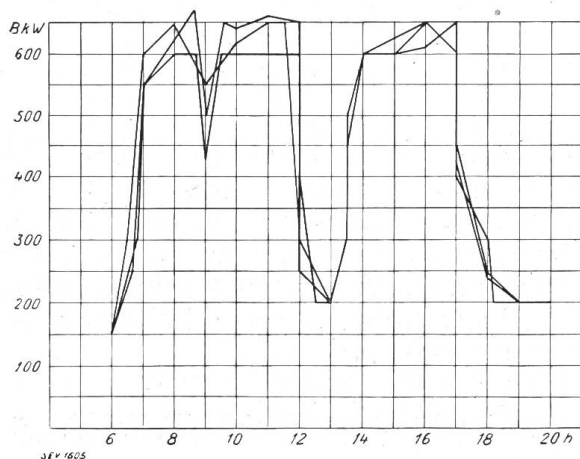


Fig. 6.

Blindleistungsdigramm, aufgenommen in der Wagonfabrik Schlieren.

Die gewählte Leistung von 500 BkW gestattet zu den Zeiten grösster Blindleistung zwar keine völlige Kompensation, wohl aber eine sehr starke Verbesserung des $\cos \varphi$. Die Gesamtleistung wird durch drei Schalter in Teilbeträge von $200 + 200 + 100$ BkW unterteilt. Infolge der niedrigen Spannung von 350 V wird mittels eines Autotransformators auf 600 V hinauftransformiert. Der primärseitige Oelschalter besitzt Maximalstrom- und Minimalspannungsauslösung, die sekundärseitigen Oelschalter sind nicht automatisch, besitzen jedoch Einschaltwiderstände von je ca. 1,5 bis 1,8 Ohm und Entladewider-

stände, welche die Batterie nach der Abschaltung sofort entladen und damit gegen Berührung gefahrlos machen. Auf eine Maximalstromauslösung konnte verzichtet werden, weil die einzelnen Kondensatoren, die eine Leistung von je 31,2 BkW aufweisen, einzeln gesichert sind. Die ganze Kondensatorbatterie besteht aus 16 solchen Kondensatoren, von denen 2×6 und 1×4 in ein gemeinsames Gestell

eingebaut sind. Die Schalter sind über den Gestellen auf profileisernen Traversen angebracht. An Messgeräten sind vorhanden: 3 Ampèremeter mit Stromwandlern auf der Primärseite des Transformators, 1 Voltmeter mit Voltmeterumschalter auf der Sekundärseite. Wegen dem sehr beschränkten Raum wurden alle Schalter und Stromwandler über den Kondensatoren montiert.

f) Hochspannungskondensatorenanlage S. in Indien.

In eine Gegend mit Tropenklima wurde eine bemerkenswerte Kondensatoranlage mit einer Gesamtleistung von 1000 BkW bei 5800 V verketteter Spannung geliefert, welche durch Oelschalter in Teilbeträge von 600, 300 und 2×50 BkW einzeln schaltbar sind. Die Kondensatoren sind einphasig (Fig. 7) und besitzen je eine Leistung von 17 BkW. Sie werden in Stern an die darüber weggehenden Sammelschienen angeschlossen. Jeder Kondensator ist einzeln mit einer direkt an die vorderseitige Durchführung angebauten Sicherung geschützt. Je sechs Kondensatoren sind zusammen in einen eisernen Tragrost gestellt (Fig. 8). Die 60 Kondensatoren wurden in zwei übereinander befindlichen Reihen angeordnet.

Die Oelschalter besitzen Entladewiderstände, über welche die abgeschalteten Kondensatoren selbsttätig spannungslos gemacht werden. Die Schaltanlage wurde durch die A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden gebaut. Fig. 9 zeigt das Schaltschema, Fig. 10 den Aufriss eines Teiles der Anlage. Die Schattentemperatur am Aufstellungsort beträgt bis 35°C .

Konstruktiv gleiche Kondensatoren werden mit etwas größeren Massen für Spannungen bis 10000 V gebaut.

g) Hochspannungsanlage Wädenswil der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E.K.Z.).

Zur Verbesserung des Leistungsfaktors in der Schaltstation Wädenswil wurde eine Kondensatorbatterie von 200 BkW Leistung direkt über einen Oelschalter an die ankommende Hochspannungsleitung mit 8800 V verketteter Spannung angeschlossen. Die Kondensatoren sind also den

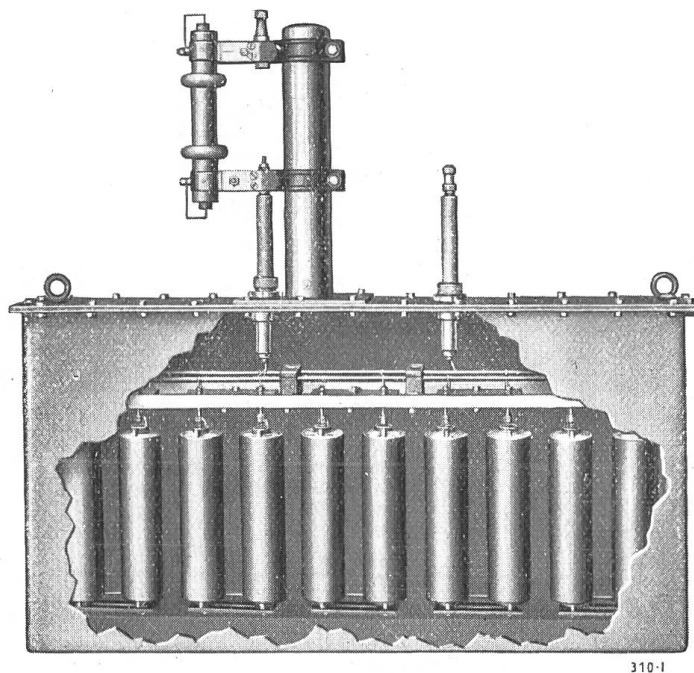


Fig. 7.

Hochspannungskondensator mit Sicherung.
17 BkW, 3400 V, 50 Per/s.

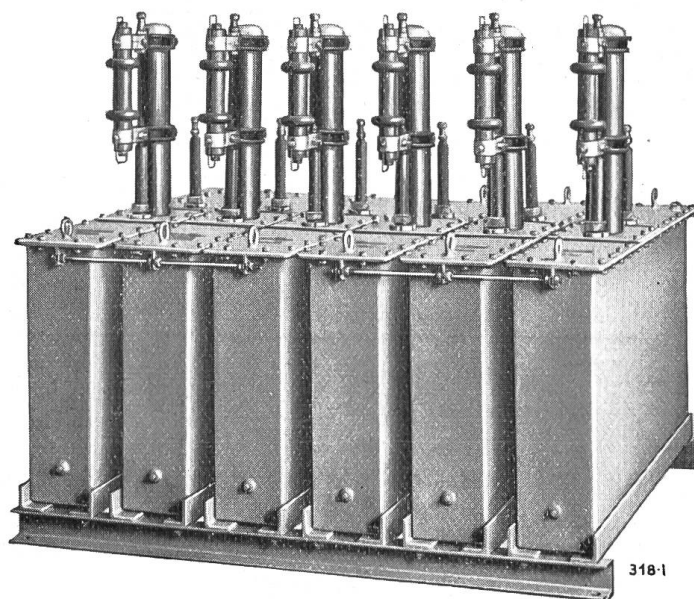


Fig. 8.

Gruppe von Hochspannungskondensatoren mit Sicherungen.
100 BkW, 5800 V verkettete Spannung bei Sternschaltung
der Kondensatoren, 50 Per/s.

Leitungsüberspannungen voll ausgesetzt. Sie erfüllen infolge ihrer grossen Kapazität nebenbei die Rolle eines vorzüglichen Sprungwellenschutzes. Der Oelschalter ist mit Einschalt- und Entladewiderständen ausgerüstet; er besitzt Nullspannungsauslösung, nicht aber Ueberstromauslösung. Nach Netz-Kurzschlüssen wird ein Prüf-Wechsel-

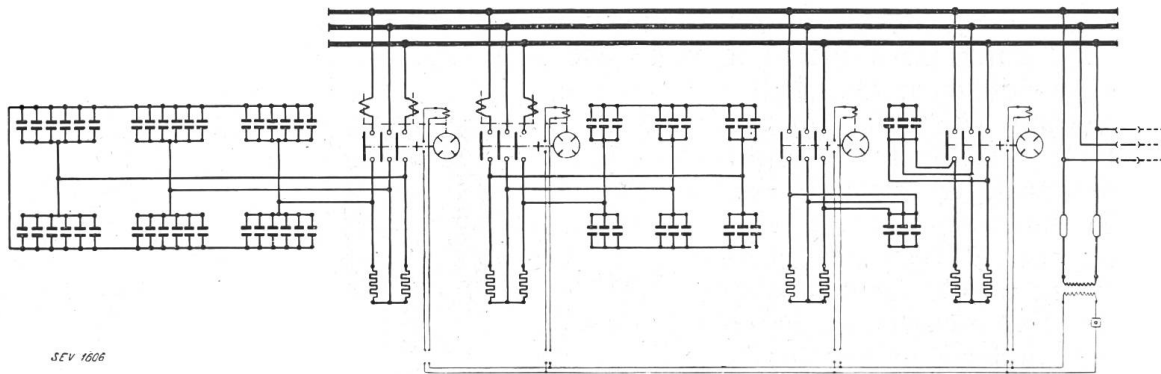


Fig. 9.

Schaltschema der Hochspannungs-Kondensatorenanlage S. in Indien.

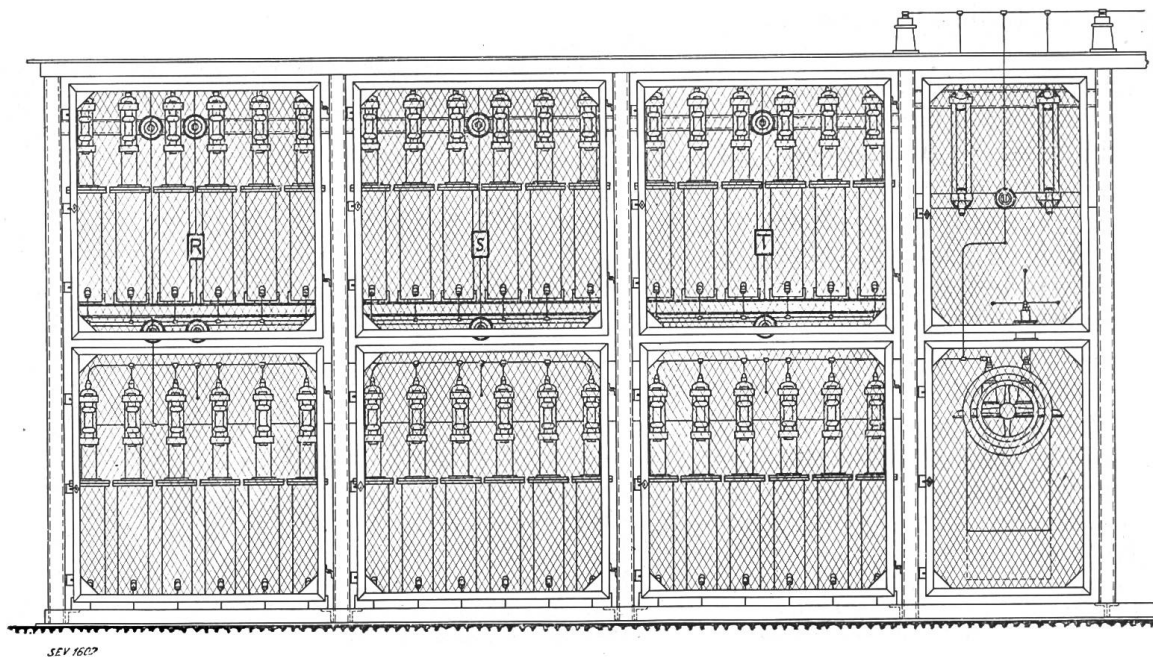


Fig. 10.

Aufriss der Hochspannungs-Kondensatorenanlage S. in Indien.

strom über eine Drosselspule in das Netz geschickt. Dabei besteht die Gefahr einer Resonanz, wenn die Kondensatoren geschaltet sind. Aus diesem Grunde war eine Nullspannungsauslösung nötig. Dafür sind die zwölf Kondensatoren, von denen je vier parallel und die drei Gruppen in Stern geschaltet sind, einzeln durch Röhrensicherungen geschützt. Fig. 11 zeigt das Schaltschema der Anlage, Fig. 12 die Kondensatoren mit darüber montierten Trennsicherungen.

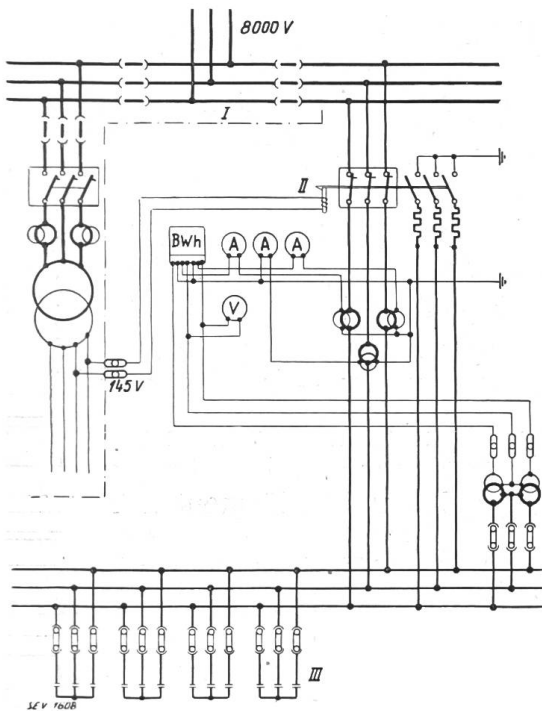


Fig. 11.

Schalt-schema der Hochspannungs-Kondensatoren-anlage Wädenswil.
Der mit I bezeichnete Teil der Anlage war vorhanden. II Minimalspannungsauslösung.

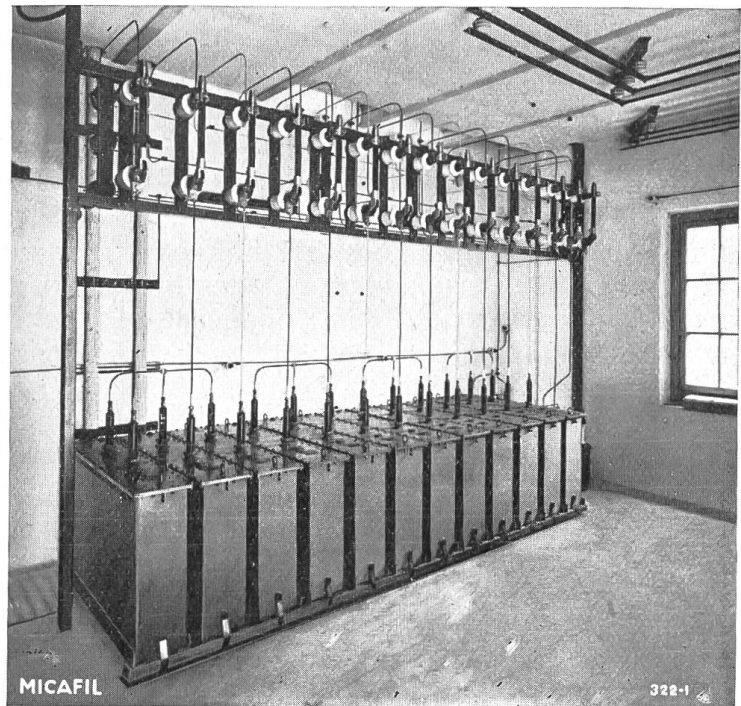


Fig. 12.

Hochspannungs-Kondensatoren-Batterie mit darüber montierten Sicherungen in Anlage Wädenswil. 200 BkWh, 8800 V, 50 Per/s.

4. Wirtschaftliche Grenzen für die Anwendung der statischen Kompensation.¹⁾

Der statische Charakter, das Fehlen von bewegten Teilen, der Wegfall von Bedienung und Wartung, die denkbar einfachste Inbetriebsetzung und die grosse Betriebssicherheit lassen die statische Kompensation im allgemeinen als ideales Mittel zur Verbesserung des $\cos\varphi$ erscheinen. Immerhin gibt es einige Charakteristiken, welche gegen die Anwendung der Kondensatoren sprechen.

Das unbestrittenste Gebiet ist das der kleinen Leistungen von wenigen kVA, weil hier die genannten Vorzüge am wesentlichsten sind und zudem der Preis niedriger ist als derjenige rotierender Kompensatoren (elektromagnetische Kompensation).

Die Preiskurve, den Preis in Funktion der reaktiven Leistung darstellend, aufgetragen einerseits für die statische, anderseits für die elektromagnetische Kompensation, weist einen Schnittpunkt auf, der je nach Höhe der Betriebsspannung und der gewählten Maschinen zwischen etwa 50 und einigen hundert BkWh liegt. Mit Berücksichtigung des kleinen Eigenverbrauchs der statischen Kompensation ergibt sich die Tatsache, dass diese heute oft bis zu Leistungen von etwa 1000 und gelegentlich noch mehr BkWh vorteilhaft ist. Bei ganz grossen Leistungen wird der Preisunterschied zwischen rotierenden und statischen Kompensatoren zugunsten der ersteren zu gross und die übrigen der eingangs erwähnten Vorzüge der letzteren sind teilweise nicht mehr ausgeprägt. Die Kondensatoren nehmen bei grossen Leistungen auch etwas viel Raum ein.

Als günstige Spannungen können solche von etwa 380 V an aufwärts bezeichnet werden. Für 220 V sind nur kleine Anlagen für die statische Methode noch günstig und dies nur dank sehr geringer Gewinnzuschläge der Fabrikanten für solche Typen. Besonders günstig sind die Spannungen von 500 V und mehr, weil sie eine gute

¹⁾ Vergl. auch Bull. SEV 1929, No. 18, S. 625.

Ausnützung des Dielektrikums gestatten. Ueber einigen kV liegt jedoch eine obere Grenze, weil die Kosten für Oel, Kesselmaterial, Isolierteile, Durchführungen usw. auf erhebliche Beträge wachsen, so dass der Preis für die Blindleistungseinheit wieder grösser wird. Bei Spannungen unter etwa 300 V werden Kondensatoren mit Vorspann-Autotransformator von mittleren Leistungen (einige 10 BkW) an vorteilhaft. Bei ganz kleinen Leistungen ist der relative Preis des Transformators im allgemeinen zu hoch. In bezug auf die Anschaffungskosten wären Vortransformatoren oft auch noch bei höheren Spannungen, bis etwa 350 V, vorteilhaft, nicht aber bei Berücksichtigung der hiedurch erhöhten Verluste. Die übrigen angenehmen Eigenschaften der Kondensatoren gelten ähnlich auch von den Transformatoren, weshalb diesbezüglich eine Kombination der beiden Apparate keine Beeinträchtigung bedeutet.

In kleineren und mittleren Anlagen, namentlich wo nicht zum voraus vorgesehene Räume für die Aufstellung zu verwenden sind, ist für die Kondensatoren die Anpassungsfähigkeit an den Raum, das Fehlen rüttelnder und lärmender Teile günstig.

Eindringlich sei auch darauf aufmerksam gemacht, dass Hochspannungs-Kondensatoranlagen, neben der Verbesserung des Leistungsfaktors, infolge ihrer grossen Kapazität einen vorzüglichen Sprungwellenschutz darstellen.

Wenn auch die Rentabilität von statischen Kondensatoren von Fall zu Fall zu prüfen ist, seien doch im folgenden einige konkrete Beispiele vorgerechnet, die u. a. auch zeigen, wie die kleinen Verluste der Kondensatoren hiebei eine wesentliche Rolle spielen.

Vergleichende Rentabilitätsberechnung für zwei Synchronmotoranlagen und entsprechende Kondensatorbatterien für Phasenschiebung.

Voraussetzungen:

1. Preis pro BkWh: 1 Rp.
2. Preis pro kWh: 5 Rp.
3. Anzahl Betriebsstunden pro Monat, während welcher der Synchronmotor bzw. die Kondensatorbatterie voll belastet ist: 250 h.
4. Es wird angenommen, dass während der Nacht der $\cos \varphi$ derart hoch ist, dass der Phasenschieber vom Netz abgetrennt werden darf.
5. Anschaffungskosten eines *Synchronkompensators*, dreiphasig, mit angebautem *Erreger*, *Anlasstransformator*, *Schalteneinrichtung* zum Anlassen, *Magnetregulator*, 2 *Stromwandlern* für die Strommessung, 2 *Ampèremeter*, 1 *Voltmeter*, 1 *Voltmeterumschalter* und *Hauptschalter*.
 - a) 220 BkW, 600 V, 50 Per/s, 1000 U/m Fr. 13 300.—
 - b) 1200 BkW, 600 V, 50 Per/s, 1000 U/m Fr. 30 000.—
- Anschaffungskosten einer *Kondensatorbatterie*, dreiphasig, inkl. *Kondensatorgestelle*, *Hauptschalter*, *Entladewiderständen*, 2 *Stromwandlern* für Strommessung, 2 *Ampèremeter*, 1 *Voltmeter*, 1 *Voltmeterumschalter*.
 - a) 220 BkW, 600 V, 50 Per/s Fr. 9 900.—
 - b) 1200 BkW, 600 V, 50 Per/s Fr. 50 000.—
7. Verzinsung des Kapitals und Tilgung: 15 %.
8. Verluste:

a) Synchronmotor	220 BkW : 15 kW
b) Synchronmotor	1200 BkW : 50 kW
c) Kondensatorbatterie	220 BkW : 0,77 kW
d) Kondensatorbatterie	1200 BkW : 4,2 kW
9. Rechnungsstellung an Abonnenten jedes Vierteljahr.

Vergleichende Rentabilitätsberechnung.

<i>a) Synchronanlage 220 BkW.</i>		<i>b) Kondensatorbatterie 220 BkW.</i>	
1. Auslagen.	Fr.	1. Auslagen.	Fr.
Verzinsung u. Tilgung 0,15 · 13300 Fr. =	1995.—	Verzinsung u. Tilgung 0,15 · 9900.— Fr. =	1485.—
Verluste pro Vierteljahr:		Verluste pro Vierteljahr:	
3 · 250 · 15 · 0,05 Fr. = 562.50 Fr.,		3 · 250 · 0,77 · 0,05 = 29.— Fr., zu	
zu 5% an Zins und Zinseszins ge-		5 % an Zins und Zinseszins gelegt,	
legt, ergibt nach einem Jahr . . . =	2294.—	ergibt nach einem Jahr . . . =	118.—
Total der jährlichen Auslagen . . . =	4289.—	Total der jährlichen Auslagen . . . =	1603.—

2. Einnahmen.

Vierteljährl. Ersparnis an Blindstrom: $3 \cdot 250 \cdot 220 \cdot 0,01 \text{ Fr.} = 1650.- \text{ Fr.},$ zu 5 % an Zins und Zinseszins ge- legt, ergibt nach einem Jahr . . . = 6724.—	
Jährlicher Ueberschuss	= 2435.—

a) Synchronanlage 1200 BkW.

1. Auslagen.	Fr.
Verzinsung u. Tilgung $0,15 \cdot 30000 \text{ Fr.} = 4500.-$	
Verluste pro Vierteljahr: $3 \cdot 250 \cdot 50 \cdot 0,05 \text{ Fr.} = 1875.- \text{ Fr.},$ zu 5 % an Zins und Zinseszins ge- legt, ergibt nach einem Jahr . . . = 7645.—	
Total der jährlichen Auslagen . . .	= 12145.—

2. Einnahmen.

Vierteljährl. Ersparnis an Blindstrom: $3 \cdot 250 \cdot 1200 \cdot 0,01 \text{ Fr.} = 9000.- \text{ Fr.},$ zu 5 % an Zins und Zinseszins ge- legt, ergibt nach einem Jahr . . . = 36720.—	
Jährlicher Ueberschuss	= 24575.—

2. Einnahmen.

	6724.—
	5121.—

b) Kondensatorbatterie 1200 BkW.

1. Auslagen.	Fr.
Verzinsung u. Tilgung $0,15 \cdot 50000 \text{ Fr.} = 7500.-$	
Verluste pro Vierteljahr: $3 \cdot 250 \cdot 4,2 \cdot 0,05 \text{ Fr.} = 157,50 \text{ Fr.},$ zu 5 % an Zins und Zinseszins ge- legt, ergibt nach einem Jahr . . . = 643.—	
Total der jährlichen Auslagen . . .	= 8143.—

2. Einnahmen.

	36720.—
	28577.—

Bei diesen Gegenüberstellungen ist nicht berücksichtigt, dass der Synchronmotor und sein Erreger Betriebsmaterial, wie Oel für die Schmierung, Kollektor- und Schleifringbürsten verbrauchen, währenddem bei der Kondensatorbatterie der Verschleiss gleich Null ist. Ferner fallen für die Kondensatoren die Wartungskosten dahin, im Gegensatz zu einer rotierenden Gruppe. Die Vergleiche dürften also in Wirklichkeit für die Kondensatorbatterie noch günstiger ausfallen.

Diese und ähnliche Beispiele beweisen, dass sich die $\cos \varphi$ -Verbesserung im allgemeinen, ganz besonders aber mittels statischen Kondensatoren bei den heutigen Preisen als sehr wirtschaftlich erweist, weiterhin aber auch, dass bis zu Leistungen von noch wesentlich über 1000 BkW Kondensatoren wirtschaftlicher sein können als rotierende Kompensatoren, wenn nicht besondere technische Gründe die letzteren rechtfertigen.

Noch weit günstigere Zahlen ergeben sich, wenn der Betrieb der Kompensationseinrichtungen auch über Nacht erfolgt.

5. Raum- und Bodenbedarf statischer Kondensatoren.

Die Verbesserung des Dielektrikums statischer Kondensatoren ermöglichte in den letzten Jahren, den Bedarf an Bodenfläche und an Raum erheblich zu reduzieren, derart, dass der Anwendung der statischen Kompensation vom Standpunkt der Raumfrage aus heute keine Hindernisse mehr im Wege stehen. Aus Massblättern von vier führenden Firmen ergeben sich folgende Zahlen:

Raumbedarf von Kondensatoren:

Nennspannung V	Volumen		Grundfläche	Gewicht
	dm ³ /BkW 1)	dm ³ /BkW 2)	dm ² /BkW	kg/BkW
220	16–52	6–15–24	1,3–3,2	13–32
380	10–25	6–13	0,6–1,2–2,5	9–21
500	6–25	4,5–12,7	0,5–2,8	5,5–21
600	6–10–25	4–6,5	0,4–1,6	5–16
1500	8,2–31	6,8–9	0,7–1,9	8–20
6000	8,8–37	6,8–14,6	0,7–2,2	8–24

1) Aeusserste Masse, inklusive Durchführungen, Gestelle usw.

2) Kesselabmessungen.

In noch stärkerem Masse ist die Abwärtsentwicklung an den Preisen ersichtlich, die zum Teil infolge starker Konkurrenz bereits ein ungesundes Niveau angenommen haben. Man kann sich fragen, ob die Entwicklung der Dimensionen eine Grenze erreicht hat oder ob wir noch hievon entfernt sind.

Alle neueren europäischen Starkstromkondensatoren besitzen ölgetränktes Papier als Dielektrikum. Die ersten Grössenverminderungen waren möglich mit der Reduktion der dielektrischen Verluste, einesteils dank geeigneterem Papier, andernteils infolge der Verwendung von Öl anstelle fester Imprägniermasse. Die Verluste, ausgedrückt in ‰ der Blindleistung, betrugen im allgemeinen noch vor etwa zwei Jahren je nach Fabrikat zwischen 5 und 10 ‰. Heute werden im allgemeinen Werte von 3 bis 4 ‰ angegeben, zum Teil auch schon 2 bis 3 ‰. Unter dem blossen Gesichtspunkt dieser Verlustwerte ist der Höhe der elektrischen Dauerbeanspruchung eine Grenze gesetzt, die eine weitere Reduktion der Abmessungen gestatten würde. Auch die mit Gleichspannung erreichten Durchschlagsfeldstärken würden dies ermöglichen. Die Grenzfeldstärke bei Wechselspannung ist heute noch durch Unhomogenitäten des Dielektrikums gegeben, deren Wesen noch nicht genügend aufgeklärt ist, ferner durch Entladungen an den Elektrodenrändern.

Jede Erhöhung der Beanspruchungen ist sehr verlockend, da die Blindleistung bei konstanter Kapazität mit dem Quadrat der Feldstärke wächst. Gelingt es, das Dielektrikum in letztgenannter Hinsicht soweit zu verbessern, dass wiederum die Verluste ausschlaggebend werden für die Grenzbeanspruchungen, so dürften bei gleichen Kapazitäten noch Leistungssteigerungen von vielleicht 50 bis 100 % möglich werden. Schon kleine Veränderungen in der Qualität des Dielektrikums wirken sich in der Wirtschaftlichkeit der Kondensatoren in ausserordentlich starkem Masse aus, weshalb es richtig sein dürfte, noch wesentliche Weiterentwicklungen auf diesem Gebiet anzunehmen. Einzelne Fabrikanten wagen heute schon bis etwa 20 % höhere Beanspruchungen des Dielektrikums, aber da Erfahrungen über lange Jahre noch fehlen, ist grösste Vorsicht am Platz.

6. Zubehörrapparate.

Bei Preisvergleichen zwischen statischen und rotierenden Kompensatoren sollten auch die Zubehörrapparate berücksichtigt werden. Die statischen Kondensatoren erfordern im allgemeinen wenige und einfache Apparate.

Bei niedrigen Spannungen werden *Vortransformatoren* verwendet, welche die Netzspannung vor den Kondensatoren auf 500 bis 750 V transformieren. Am meisten hat sich wohl die Spannung von 600 V eingeführt. Um Anschaffungskosten und Energieverluste auf ein Minimum zu beschränken, werden Autotransformatoren verwendet. Während für allgemeine Zwecke die Eisenverluste bei Vollast kleiner gehalten werden als die Kupferverluste, ist es für Kondensatoranlagen richtiger, Eisen- und Kupferverluste einander gleich zu machen, um den Gesamtwirkungsgrad bei der stets vorhandenen Vollast auf ein Minimum zu bringen. Für kleinere Leistungen werden von der Micafil A.-G. Transformator und Kondensator zu einer konstruktiven Einheit zusammengebaut, so dass für den Bezüger keinerlei Montagearbeiten nötig sind.

Was die *Schalter* anbelangt, hat die bisherige Erfahrung folgendes ergeben: Für das Zuschalten kleinerer Blindleistungen können gewöhnliche Motorschalter verwendet werden, besser solche mit Fingerkontakten als solche mit leichten Abreisskontaktfedern. Der Einschaltstromstoss ist, wie Oszillogramme gezeigt haben, sehr gross und erreicht oft den fünffachen Wert des Dauerstromes, gelegentlich auch einen noch viel höheren Betrag. Seine Zeitdauer ist jedoch ausserordentlich kurz, so dass keinerlei schädliche Wirkungen weder auf die Kondensatoren noch auf Transformatoren oder Schaltapparate bemerkt wurden. An leichten Kontaktfedern wurden allerdings Krallenbildungen schon beobachtet.

Zum *Ueberstromschutz* werden häufig Maximalstromschalter verwendet, die jedoch nur bei eventuellen Kurzschlüssen der Kondensatoren auslösen können, da sie für etwa den zwei bis dreifachen Normalstrom eingestellt werden müssen. Ferner lösen sie gelegentlich auch beim Einschalten aus. Um empfindlicher schützen zu können und keine Wiederauslösungen beim Wiedereinschalten in Kauf nehmen zu müssen, werden, namentlich bei grösseren Blindleistungen, Schalter mit Einschaltwiderständen verwendet, die allerdings heute erst von wenigen Firmen gebaut werden und im Preis erheblich höher stehen als gewöhnliche Schalter.

Ein feiner Ueberstromschutz, der allerdings bei eventuellen Kurzschlüssen nicht sofort wirkt, ergibt sich bei Verwendung von Schaltern mit thermischer Ueberstromauslösung. Infolge der Ausschaltverzögerung schalten solche Apparate zufolge des Einschaltstromstosses nicht wieder aus, auch wenn sie auf beispielsweise 20 % Ueberstrom einreguliert sind, so dass sie beim Auftreten starker Oberwellen in Funktion treten.

Bei der Einzelkompensation von Motoren, d. h. da, wo jedem Motor ein Kondensator parallel geschaltet wird, ist es zweckmässig, den Kondensator direkt an die Motorklemmen zu schliessen und den Motorschalter somit gleichzeitig für die Schaltung des Kondensators zu verwenden. Eventuelle Motorsicherungen schützen dann auch den Kondensator.

Wenn grössere Blindleistungen durch Verwendung einer Mehrzahl kleinerer Kondensatoren zustande kommen, wie dies in Amerika längst üblich ist und in Europa durch einzelne Firmen befürwortet wird, können die Kondensatoren vorteilhaft durch Schmelzsicherungen geschützt werden, so dass dann Schalter ohne Ueberstromauslösung genügen. Ein solcher Schutz ist feiner und im allgemeinen billiger als der Schutz durch Ueberstromschalter und gestattet gleichzeitig eine Kontrolle der Kondensatoren. Ein eventuell schadhaftes Element wird durch die Sicherung angezeigt. Die Nennstromstärke der Sicherungen soll gleich dem zwei bis dreifachen Nennstrom der Kondensatoren sein, um ein Ansprechen beim Einschalten zu verhüten.

Vom Netz abgeschaltete Kondensatoren bleiben noch über längere Zeit geladen und sind daher berührungsgefährlich. Aus diesem Grunde werden die Schalter entweder mit *Entladewiderständen* derart kombiniert, dass sich die Kondensatoren im ausgeschalteten Zustand nicht schlagartig, sondern innerhalb einiger Sekunden über Widerstände entladen, oder es werden, wie unten noch dargelegt wird, ständig angeschaltete Entladewiderstände verwendet. Bei Hochspannung soll die Entladung nach Erde erfolgen. Die Entladewiderstände bestehen fast immer aus Stabmaterial, wie z. B. Silit, Karborundum usw. Solche Schalter mit Entladewiderständen haben wiederum den Nachteil eines nicht unerheblich erhöhten Preises.

Um mit normalen Schaltern auszukommen, sind auch dauernd an den Kondensatorklemmen befindliche Entladewiderstände üblich. Diese sind dann so zu bemessen, dass die Kondensatoren innert sehr kurzer Zeit auf eine gefahrlose Spannung entladen werden und doch kein merklicher dauernder Leistungsverlust in Kauf zu nehmen ist. Es ist im allgemeinen möglich, so zu dimensionieren, dass eine genügende Entladung innerhalb einer Minute erfolgt und die Verlustleistung der Kondensatoren durch die Widerstände nur um 5–10 % erhöht wird. Aus dieser Bedingung ergibt sich für Entladewiderstände die Formel:

$$R = \frac{15 \cdot 10^6}{C},$$

wobei R = Widerstand pro Phase,

C = Gesamtkapazität der 3 Phasen der Kondensator-Batterie in μF .

Die Entladewiderstände werden oft in Kondensatoren eingebaut, richtiger aber ausserhalb derselben angeschaltet, damit sie einer Kontrolle zugänglich sind. Bei Kondensator-Batterien können sie direkt an die Klemmen der einzelnen Kondensatoren geschaltet werden, oder es lassen sich zentrale Widerstände verwenden. Letzteres ist im Interesse einer genaueren Dimensionierung vorzuziehen. Bei Hoch-

spannungs-Kondensatoren sollen die Widerstände zwischen den einzelnen Phasen und Erde geschaltet sein, während bei Niederspannungs-Kondensatoren die Entladung von Phase zu Phase genügt. Sind Kondensatoren ohne Zwischenschaltung von Trennern oder Schaltern ständig mit der Wicklung eines Transformators oder eines Motors verbunden, so sind Entladewiderstände überflüssig, da die Entladung über die Wicklung sofort nach dem Abschalten erfolgt.

Als weitere Zubehörapparate kommen *Messgeräte* in Betracht. Es ist zweckmässig, wenigstens bei grösseren Kondensatoren mindestens die Stromstärke in den einzelnen Phasen und die Spannung zu kontrollieren. Wird vorübergehend ein erhöhter Strom beobachtet, so sind Oberwellen vorhanden, die zu verschiedenen Tageszeiten ihren Charakter erheblich ändern können. Ein dauernder, anfänglich nicht beachteter Ueberstrom kann die Ursache im Durchschlag einzelner Kondensatorelemente haben, sofern keine Spannungserhöhung beobachtet wird.

Graphische Berechnung von Glühlampen-Widerständen.

Von *Paul Schmid*, Ingenieur beim Elektrizitätswerk der Stadt Bern.

518.4 : 621.316.8 : 621.326

Die Berechnung von Regulierwiderständen zu Glühlampen-Stromkreisen wird dadurch erschwert, dass der Widerstand der Glühlampen — weil temperaturabhängig — vom vorgeschalteten Widerstand beeinflusst wird. Es wird eine Rechentafel beschrieben, die erlaubt, für jede Spannung und Glühlampenkombination den erforderlichen Regulierwiderstand und die sich dabei ergebenden Stromstärken zu ermitteln. Die Verwendung der Rechentafel wird durch ein Rechenbeispiel erläutert.

Le calcul de résistances réglables pour circuits de lampes à incandescence se complique du fait que la résistance propre des lampes, dépendant de la température, est influencée par la résistance en série. L'auteur décrit une table permettant, pour toute tension et pour n'importe quelle combinaison de lampes, de calculer la résistance réglable nécessaire et les intensités qui en résultent. L'emploi de la table est démontré sur un exemple numérique.

I. Einleitung.

Die Einschaltung von Regulier-Widerständen in Glühlampen-Stromkreise erfolgt zur Beeinflussung des ausgestrahlten Lichtstromes, wie dies in Verbindung mit verschiedenfarbigen Lampengruppen zur Erzielung der mannigfaltigsten Beleuchtungseffekte in Theater und Kino zur Anwendung gelangt.

Wenn schon im allgemeinen die Lieferung solcher Anlagen durch Spezialfirmen erfolgt, so können doch auch die Elektrizitätswerke, z. B. bei Netzumschaltungen auf Normalspannung, in die Lage versetzt werden, sich mit derartigen Anlagen befassen zu müssen. Mit Rücksicht darauf, dass es sich bei diesen Anlagen um verhältnismässig teure Objekte handelt, die sowohl in bezug auf Feuersicherheit als auch auf Regulierfähigkeit gewissen Ansprüchen genügen müssen, dürfte es am Platze sein, an dieser Stelle ein graphisches Verfahren kurz zu beschreiben, nach welchem sowohl die Widerstandswerte der Regulierwiderstände ermittelt werden können als auch die Stromstärken, die sich bei einer gegebenen Glühlampenkombination bei einer beliebig eingestellten Regulierstufe ergeben. Die Kenntnis der Stromstärken dient jeweils zur Querschnittermittlung im betreffenden Widerstandsabschnitt.

II. Ableitung des graphischen Verfahrens.

Unserer Berechnung liegt eine Schaltung der Glühlampen und des Regulierwiderstandes zu Grunde, wie sie in Fig. 1 dargestellt ist. Eine Bühnenbeleuchtung lässt sich dann aus einer mehr oder weniger grossen Zahl solcher Einheiten aufbauen, welche alle an den Klemmen *A* und *B* an die Netzspannung angeschlossen zu denken sind.