

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 36 (1945)

Heft: 7

Artikel: Der Schaltvorgang bei Schnellsynchronisierung

Autor: Keller, R. / Frey, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060211>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

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

	<i>Pro Fr. 100.— Einnahmen</i>		
	Energiekonsum	Energiekosten = in %	
Kochen	36,4 kWh	Fr. 1.54	1,54
Heisswasser bei gemischtem Betrieb Elektrizität/Kohle	83 kWh	Fr. 1.67 Fr. 1.48	1,67 1,48
bei rein elektrischem Betrieb			
Total	119,4 kWh	Fr. 3.21 bzw. Fr. 3.02	3,21 bzw. 3,02

Der Kostenanteil für die Heisswasserzubereitung bewegt sich wertmässig in den Grenzen, die für solche Zwecke allgemein angenommen werden müssen. Dagegen ist der mengenmässige Anteil etwas hoch. Der Grund hierfür liegt zum grössten Teil in dem sehr verlustreichen und ausgedehnten Rohrnetz. Dieses dehnt sich auf mehrere Stockwerke aus, und die einzelnen Abnahmestellen liegen weit auseinander. Die Rohrleitungen sind reichlich dimensioniert und nicht überall gut isoliert, wodurch dauernde Wärmeverluste nicht zu vermeiden sind.

Betriebskostenvergleich zwischen Kohle und Elektrizität für das Kochen

Vor der Elektrifizierung dieser Grossküche wurden alle Mahlzeiten mit Ausnahme der Frühstücke und teilweise auch der Suppen auf einem grossen Kohlenherd zubereitet.

Der Kohlenverbrauch betrug im Jahre 1943 rund 136 000 kg. In den Jahren vor dem Kriege, als noch warme Mahlzeiten bis um Mitternacht abgegeben werden durften, schwankte der Kohlenbedarf von 200 000...260 000 kg pro Jahr. Mit diesen Kohlemengen wurde gekocht und ein Teil des warmen Wassers für die Küche mittels mehrerer im Herd eingebauter Heisswasserschlangen zubereitet. Der Anteil der Heisswasserzubereitung ist nicht genau bekannt. Schätzungsweise wurden auf diese Art täglich etwa 3000...5000 Liter Heisswasser von 60 Grad erzeugt. Unter dieser Voraussetzung dürften etwa 15...20 % der im Grossherd verbrauchten Kohlenmenge für die Heisswasserbereitung aufgewendet worden sein. Der Kohlenbedarf für das

Kochen allein stellte sich somit im Jahre 1943 auf $136\ 000 \times 0,8 = 108\ 800$ kg.

Die Zahl der im Jahre 1943 abgegebenen Mahlzeiten war ungefähr die gleiche wie im Jahre 1944, so dass die Kohlenmenge ohne weiteres mit dem Energiebedarf an Elektrizität verglichen werden kann.

Für diese Grossküche ergibt sich somit ein Aequivalent für Kohle und Elektrizität von

$$\frac{279\ 530 \text{ kWh}}{108\ 800 \text{ kg}} = 2,57, \text{ d. h.}$$

um 1 kg Kohle zu ersetzen, sind in der vorliegenden Grossküche 2,57 kWh erforderlich. Der Betriebskostenvergleich zeigt folgendes Bild:

Die Ausgaben für Brennstoff für das Kochen stellen sich auf Grund der gegenwärtigen Preise von Fr. 15.70 pro 100 kg auf

$$\frac{108\ 800 \times 15.70}{100} = \text{Fr. } 17\ 083.—$$

Bei Zukauf von rationierungsfreiem Brennstoff sind die Ausgaben noch entsprechend höher. Die Energiekosten betrugen im Jahre 1944 Fr. 11 669.—. Die Einsparung an Betriebsmitteln durch die Elektrifizierung stellt sich somit unter der Voraussetzung, dass ausschliesslich rationierter Brennstoff verfeuert wird, auf Fr. 17 083.— minus Fr. 11 669.— = Fr. 5414.— pro Jahr. Preisgleichheit würde bei dieser Anlage dann eintreten, wenn der Kohlenpreis auf ca. Fr. 10.70 pro 100 kg sinken würde. Neben den Einsparungen an Betriebskosten brachte die Elektrifizierung noch eine ganze Reihe zahlenmässig nicht zu erfassender Vorteile: Einsparung an Wäsche, Wegfall der Kohlenlagerung und des täglichen Transportes, ferner die Ueberwachung des Feuers, grössere Sauberkeit in der Küche, Wegfall der periodischen Kaminreinigung usw.

Adresse des Autors:

H. Hofstetter, Ingenieur, Glaserbergstrasse 44, Basel.

Der Schaltvorgang bei Schnellsynchronisierung

Von R. Keller und W. Frey, Baden

621.316.729

Es wird über die Entwicklung der in Europa eingeführten Schnellsynchronisierung und die damit seit ca. 12 Jahren gemachten Erfahrungen berichtet. Die Verhältnisse, welche für die maximal zulässige Frequenzdifferenz massgebend sind, werden aufgezeigt und es wird eine mathematische Berechnung des Leistungsstosses angegeben.

Das Ergebnis der Rechnung bestätigt die in der Praxis erreichte maximale Frequenzdifferenz für das Parallelenschalten von ca. 1...1,2 % für grössere Generatoren.

Les auteurs décrivent le développement du système de synchronisation rapide introduit en Europe et les expériences faites depuis une douzaine d'années avec ce système. Ils montrent quelles sont les conditions qui régissent le maximum d'écart admissible entre les fréquences et indiquent un calcul mathématique du choc de puissance.

Les résultats de ce calcul confirment l'écart maximum de 1 à 1,2 % entre les fréquences, tel qu'il se présente en pratique lors du couplage en parallèle d'alternateurs d'une puissance relativement élevée.

Vor mehr als 30 Jahren wurden bereits in Amerika Anstrengungen gemacht, die zum Parallelenschalten von Wechselstrom-Netzen nötige Synchronisierzeit herabzusetzen. Besonders wurde zunächst für kleine Generatoren die sogenannte Grobsynchronisierung entwickelt. Diese bestand darin, die ange-

nähert mit synchroner Drehzahl laufende und entsprechend Leerlauf erregte Maschine ohne Phasenabgleich über Drosselpulen oder, bei grösseren Einheiten, diese unerregt ans Netz zu schalten mit anschliessender Erregung, wo bei der zweiten Methode eine Dämpferwicklung vorhanden sein muss.

In Europa haben sich diese Methoden wegen ihrer starken Rückwirkung auf die Netze nicht durchgesetzt, dagegen zunächst das automatische Parallelschalten bei Synchronismus. Die für diese Aufgabe entwickelten Apparate bezweckten in erster Linie, Maschinen beliebiger Bauart unter Vermeidung von Laststößen ans Netz zu schalten. Diese Einrichtungen brachten darum bezüglich Zeitaufwand gegenüber dem Schalten durch geübtes Personal keinen Gewinn; sie waren deswegen vor allem für bedienungslose Kraftwerke bestimmt. Um dort den Schaltwärter ganz zu ersetzen, mussten die Apparate noch durch eine weitere Einrichtung ergänzt werden, welche durch Einwirkung auf die Turbinensteuerung die Frequenzdifferenz auf denjenigen Wert reduziert, der vom automatischen Parallelschaltapparat für stossfreies Zuschalten begrenzt wird. Je nach Zustand des Netzes und Charakter des Turbinen-Leerlaufes ist die für solch genaues Schalten nötige Zeit verschieden. In dringenden Fällen, wo das rasche Zuschalten einer Einheit oder das Kuppeln von abgefallenen Netzteilen für die Aufrechterhaltung des Verbundbetriebes entscheidend ist, bedeutet aber ein derart genaues Anpassen der Netzfrequenzen einen unverantwortlichen Zeitverlust.

Diese Verhältnisse waren wegweisend für die Weiterentwicklung der automatischen Parallelschalt-Apparatur zu einer Schnellsynchronisierung, welche das Parallelschalten bei einer grösseren Frequenzdifferenz vollzieht als dies bei Handschaltung der Fall ist.

Die seitherige Entwicklung hat gezeigt, dass auch Druckluft-Höchstspannungsschalter trotz ihren ausgezeichneten Eigenschaften punkto Abschaltzeit Einschaltzeiten bis zu $t = 0,3$ s benötigen. Die Schnellsynchronisierung mit einem solchen Schalter bei einer angenommenen Frequenz-Differenz von $\Delta f = 1\%$ benötigt einen Vorgabewinkel von

$$\varphi = \Delta f \cdot t \cdot 360 = \frac{50}{100} \cdot 0,3 \cdot 360 = 54^\circ.$$

Wäre die Schaltzeit 0,1 s, so müsste die nötige Voreilung beim Schalten mit derselben Frequenzdifferenz immer noch 18° betragen. Verwendet man eine Schalteinrichtung mit konstantem Vorgabewinkel und stellt man diese entsprechend den angegebenen Verhältnissen für einwandfreies Schalten bei einer Frequenzdifferenz von 1% mit $\varphi = 18^\circ$ ein, so ergibt dies anderseits beim Schalten mit $\Delta f = 0$ einen Phasenfehler von $\varphi = 18^\circ$, was allein einen Leistungsstoss von ca. 80% der Nennlast zur Folge hat.

Diese Feststellung führte zur Erkenntnis, dass bei Verwendung von modernen Hochspannungsschaltern zum raschen Parallelschalten eine auf die beschriebene Art funktionierende Schnellsynchronisierschaltung ebenfalls zweckmässig ist. Der nötige Vorgabewinkel darf nicht ohne weiteres an Schalter mit beliebig hohen Eigenzeiten angepasst werden, wie folgende Ueberlegung zeigt: Es ist ohne weiteres einleuchtend, dass mit zunehmender Schaltzeit auch die Möglichkeit für die Entstehung einer Veränderung der Frequenzdifferenz während der

Schaltperiode wächst. Rechnet man z. B. mit einer zeitlichen Änderung der Frequenzdifferenz Δf 0,1 Per./s bzw. 0,2% pro Sekunde nach gegebenem Kommando für einen Schalter mit 0,8 s Einschaltzeit, so ergibt sich der Phasenfehler im Moment der Schalter-Schliessung aus folgendem:

$$\varphi = \frac{\Delta f}{2} \cdot t \cdot \underline{360}$$

$$\varphi = \frac{0,1 \text{ Per./s}}{2} \cdot 0,8 \cdot 360 = \underline{14,4^\circ \text{ el.}}$$

was allein einen Leistungsstoss von ca. Halblast bedeutet.

Es entstand darum das Bedürfnis nach automatischen Schalteinrichtungen, welche das gefühlsmässige Abschätzen des Vorgabewinkels für die Kommandogabe durch den Schaltwärter selbsttätig mess-technisch erfassen und damit den Schaltmoment der jeweiligen Frequenzdifferenz anpassen, so dass die Schliessung des Schalters genau bei Phasenkoinzidenz erfolgt. Die praktische Realisierung dieser Aufgabe erfolgte unseres Wissens in Europa erstmals in den Jahren 1931..1933 für die 35 000-kVA-Generatoren des Schluchseewerkes durch die Firmen Brown Boveri und SSW. Das Spitzenwerk hatte gegenüber andern Teilnehmern die Verpflichtung übernommen, bei Störungen in kürzester Zeit mit Reservegruppen einzuspringen. Die Bedingungen waren dementsprechend sehr streng und verlangten das Parallelschalten in 7 s von Leerlauf ausgehend oder in 2 min aus Stillstand mit geschlossenem Kugelschieber. Dabei musste das sichere Funktionieren bei krassen Abweichungen der Netzspannungen und auch der Netzfrequenz gewährleistet bleiben.

Wie eingangs erwähnt, bezweckt die Schnellsynchronisierung das Parallelschalten bei wesentlich grösserer Frequenzdifferenz als üblich. Die Grenze dieser Differenz soll dabei allein durch den für den Ausgleich dieses Gangunterschiedes nötigen Leistungsstoss und durch die Stabilitätsbedingungen des Netzes bestimmt sein. Die Schaltvorgänge bei den verschiedenen Schnellsynchronisier-Verfahren wurden an einer VDE-Tagung im Juni 1931 eingehend diskutiert und wurden auch im Fachbericht 1931 (Seite 70) veröffentlicht, mit Wiedergabe von oszillographischen Aufnahmen der Schaltvorgänge. Heute darf darauf hingewiesen werden, dass sich diese in der nun abgelaufenen zwölfjährigen Betriebsdauer tadellos bewährt haben. Von den Brown Boveri-Apparaturen ist bekannt, dass sie im Jahre 1943 über 400 einwandfreie Schnellschaltungen ausführten.

Ueber den zuzulassenden maximalen Schlupf gab man sich schon damals Rechenschaft. Peters wies schon darauf hin, dass der grösste Schlupf zum Parallelschalten bei Phasenkoinzidenz von Synchronmaschinen durch ihre Eigenschwingungszahl γ_0 gegeben ist. Der Grenzwert des Schlupfes darf demnach die Pendelgeschwindigkeit, die beim Auslenkwinkel $\vartheta = \pi$ in der Phasengleichheitslage entstehen würde, nicht überschreiten. Rechnet man mit

Eigenschwingungswerten von 1 Per./s, so ergibt sich der maximale Schlupf aus $s = \frac{\gamma_0}{f} \cdot 2$ zu 4% ¹⁾.

Diese Werte sind theoretisch Höchstwerte ohne Einschluss einer Sicherheitsmarge. Bis an diese Grenze zu gehen wurde selbstverständlich nie gewagt, am wenigsten bei grossen Maschinen.

In Fig. 1a und 1b ist der Verlauf der Leistungsschwingung bei schlechter und guter, bzw. mit und ohne Phasenfehler dargestellt. Der erste momentane Leistungsstoss A ist um so grösser, je grösser der

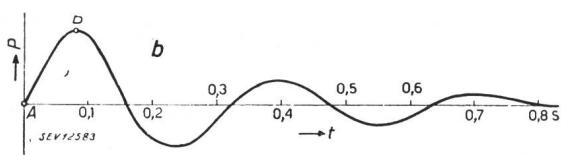
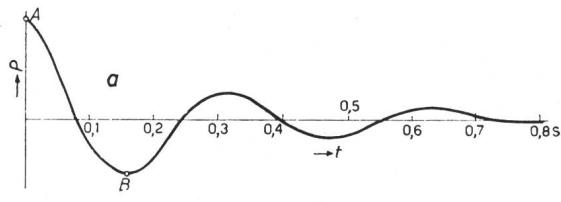


Fig. 1a und 1b.

Phasenfehler ist, der zweite Stoss B dagegen kleiner. Bei der genauen Schaltung (Fig. 1b) ist der erste Stoss A gleich Null, der zweite B dagegen ein Maximum, um nachher abzuklingen. Einen eindeutigeren Anhaltspunkt für die Begrenzung des maximalen Schlupfes liefert dagegen die Bestimmung des dabei zuzulassenden Leistungsstosses.

Der folgende mathematische Rechnungsgang zur Ermittlung des Leistungsstosses geht von der Annahme aus, dass die Schalterschliessung genau bei Phasenkoinzidenz erfolge.

Berechnung der Schaltstösse

Wir führen die folgenden Bezeichnungen ein:

- U_1 Netzspannung
- U_2 Maschinenspannung
- X Reaktanz zwischen der Maschinenspannung und der Netzzspannung
- ϑ Winkel zwischen diesen Spannungen
- P abgegebene Wirkleistung
- P_n Nennleistung
- P_{\max} grösste Ausgleichsleistung beim Synchronisieren
- ϑ_n Winkel im Nennbetrieb
- ϑ_{\max} grösster Winkel, der beim Einschwingvorgang nach dem Synchronisieren auftritt
- T_a Anlaufzeitkonstante der Maschine $T_a = \frac{GD^2 n^2}{0,37 \cdot P} \cdot 10^{-6}$
- s Schlupf
- s_{zul} Höchstzulässiger Schlupf für einen vorgeschriebenen Wirklaststoss
- τ Zeit vom Moment des Synchronisierens bis zur Erreichung der grössten Austauschleistung
- ω Kreisfrequenz
- Θ Trägheitsmoment der Maschine
- p Polpaarzahl
- η Verhältnis zwischen dem maximalen Wert der Austauschleistung und der Nennwirkleistung

¹⁾ Siehe Fussnote zu Gleichung (9).

Wir setzen voraus, dass eine einzelne Maschine an ein unendlich starkes Netz geschaltet werden soll.

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \vartheta \quad (1)$$

Für den Nennbetrieb gilt

$$P_n = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \vartheta_n$$

Daher kann man (1) schreiben

$$P = P_n \frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta_n} \quad (2)$$

Das elektrische Drehmoment ist:

$$M = p \frac{P_n}{\omega} \cdot \frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta_n}$$

Beim Synchronisieren ist das Moment der Primärmaschine Null, das elektrische Moment ist das einzige Moment, das auf die Maschinenwelle wirkt. Um die Bewegung des Polrades zu bestimmen, benutzen wir den Energiesatz folgendermassen: Die überschüssige kinetische Energie des Polrades ist:

$$W_k = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\vartheta}}{p} \right)^2 \Theta \quad (3)$$

Während des Einschwingvorgangs gibt das Polrad diese Energie an das Netz ab. Diese in potentielle Energie umgewandelte Energie berechnet sich zu

$$W_p = \frac{1}{p} \int_0^\vartheta M d\vartheta = - \frac{P_n}{\omega \sin \vartheta_n} \{ \cos \vartheta - 1 \} \quad (4)$$

Die ans Netz abgegebene Energie ist gleich der abgegebenen kinetischen Energie. Da die kinetische Energie am Anfange der Bewegung gleich

$$\frac{1}{2 p^2} \omega^2 s^2 \Theta$$

ist, so folgt aus dem Energiesatz

$$\frac{1}{2 p^2} \omega^2 s^2 - \frac{1}{2 p^2} \Theta (\dot{\vartheta})^2 = - \frac{P_n}{\omega \sin \vartheta_n} \{ \cos \vartheta - 1 \}$$

oder

$$(\dot{\vartheta})^2 = \frac{2 \omega}{T_a \sin \vartheta_n} (\cos \vartheta - 1) + s^2 \omega^2 \quad (5)$$

wobei wir das Trägheitsmoment gemäss $\Theta = p^2 \frac{T_a P_n}{\omega^2}$ durch die Anlaufzeitkonstante T_a ausgedrückt haben. Der Polradwinkel erreicht sein Maximum, wenn die kinetische Energie Null ist. Also $\dot{\vartheta} = 0$. Daraus folgt:

$$\cos \vartheta_{\max} = 1 - \frac{s^2 \omega T_a \sin \vartheta_n}{2} \quad (6)$$

Zusammen mit (2) erhält man so aus (6) die Le-

stung P_{max} im Momente, wo das Polrad seinen Maximalausschlag erreicht hat.

$$P_{max} = P_n \frac{s^2 \omega T_a}{2} \sqrt{\frac{4}{s^2 \omega \sin \vartheta_n T_a} - 1} \quad (7)$$

An Hand der Fig. 2 erkennen wir, dass 2 verschiedene Fälle möglich sind:

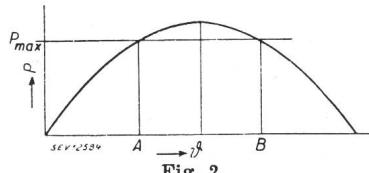


Fig. 2.

Wenn ϑ kleiner als 90° ist, so ist P_{max} tatsächlich die grösste Wirkleistung, die während des Ausgleichsvorganges nach dem Synchronisieren auftritt (B in Fig. 1b).

Ist dagegen $\vartheta > 90^\circ$, so ist P_{max} nicht mehr das Maximum der Wirkleistung. Dieses Maximum tritt vielmehr im Scheitelpunkt der Sinuskurve auf.

Wir setzen den ersten Fall voraus und fordern, dass die maximale Leistung beim Ausgleichsvorgang (Leistungsstoss) nicht grösser als ηP_n sein soll.

$$P_{max} = \eta P_n \quad (8)$$

Aus (7) und (8) folgt

$$\eta = \frac{s^2 \omega T_a}{2} \sqrt{\frac{4}{s^2 \omega \sin \vartheta_n T_a} - 1} \quad (9)^1$$

(9) kann man nach s auflösen. Man findet zwei Werte von s . Diese Werte haben folgende Bedeutung: Wenn im Momente des Synchronisierens der Schlupf gleich einem dieser beiden Werte ist, so ist die Wirkleistung beim maximalen Polradausschlag gerade P_{max} . Die beiden Werte entsprechen den beiden Fällen nach Fig. 2. Soll P_{max} wirklich den grössten auftretenden Wirklaststoss darstellen, so darf man nur denjenigen Wert von s berücksichtigen, der zum Fall A gehört. Man findet so durch Auflösung von (9) nach s

$$s_{zul} = \sqrt{\frac{2}{T_a \omega}} \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - \eta^2 \sin^2 \vartheta_n}}{\sin \vartheta_n}} \quad (10)$$

Um einen Ueberblick zu gewinnen, haben wir (10) für verschiedene Annahmen ausgewertet. In Fig. 3 ist s_{zul} in Funktion von η für die 3 Polradwinkel bei Nennlast $\vartheta_n = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ je für die Anlaufzeitkonstanten $T_a = 5$ und 10 s aufgezeichnet. Mit diesen Annahmen umfassen wir die in der Praxis vorkommenden Werte.

Man sieht, dass man die Kurven gut durch Gerade ersetzen kann. Wenn man (10) entwickelt, so

¹⁾ Wenn man berücksichtigt, dass die Grösse unter der Wurzel nicht negativ sein kann, so findet man leicht einen maximalen Wert für den Schlupf s . Zusammen mit (19) findet man bei Vernachlässigung des Korrekturgliedes in der Klammer die schon erwähnte Beziehung

$$s_{max} = 2 \frac{\vartheta_0}{f}.$$

gilt mit guter Annäherung in dem von uns betrachteten Bereich:

$$s_{zul} = 100 \sqrt{\frac{1}{\omega T_a} \sqrt{\sin \vartheta_n}} \eta \% \quad (11)$$

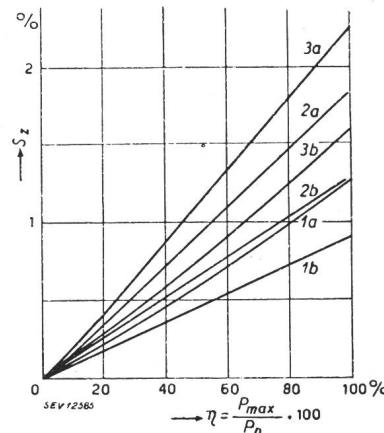


Fig. 3.

Zulässiger Schlupf (s_zul) im Momente des Zusammenschaltens, wenn der dabei entstehende Wirklaststoss η % der Nennwirkleistung nicht überschreiten soll

1a	Polradwinkel bei Nennlast 15°	Anlaufzeitkonstante 5 s
2a	» » 30°	
3a	» » 45°	
1b	» » 15°	Anlaufzeitkonstante 10 s
2b	» » 30°	
3b	» » 45°	

Für 50 Hz ($\omega = 314$) gilt:

$$s_{zul} = 5,63 \sqrt{\frac{1}{T_a}} \sqrt{\sin \vartheta_n} \eta \% \quad (12)$$

Aus (5) können wir durch Integration die Zeit τ berechnen, die vergeht, bis das Polrad den maximalen Anschlag ϑ_{max} erreicht hat, d. h. also die Zeit, die vergeht, bis die Ausgleichsleistung ihr Maximum P_{max} erreicht.

Aus (5) folgt unter Berücksichtigung von (6)

$$\frac{dt}{d\vartheta} = \sqrt{\frac{T_a \sin \vartheta_n}{2 \omega}} \frac{1}{\sqrt{\cos \vartheta - \cos \vartheta_{max}}} \quad (13)$$

Und die Zeit bis zur Leistungsspitze

$$\tau = \sqrt{\frac{T_a \sin \vartheta_n}{2 \omega}} \int_0^{\vartheta_{max}} \frac{d\vartheta}{\sqrt{\cos \vartheta - \cos \vartheta_{max}}} \quad (14)$$

Wegen $\cos \vartheta = 1 - 2 \sin^2 \frac{\vartheta}{2}$ kann man (13) auch schreiben, indem man $\frac{\vartheta}{2}$ durch α ersetzt:

$$\tau = \sqrt{\frac{T_a \sin \vartheta_n}{\omega}} \int_0^{\frac{\vartheta_{max}}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{\sin^2 \frac{\vartheta_{max}}{2} - \sin^2 \alpha}} \quad (15)$$

Die Substitution $\sin \alpha = z \sin \frac{\vartheta_{max}}{2}$ führt nach einigen Rechnungen über in

$$\tau = \sqrt{\frac{T_a \sin \vartheta_n}{\omega}} \int_0^1 \frac{dz}{\sqrt{1 - \sin^2 \vartheta_{max}/2 \cdot z^2} \sqrt{1 - z^2}}$$

Das Integral hängt nur von $\vartheta_{max}/2$ ab, und wird als vollständiges elliptisches Integral I, Gattung K, bezeichnet. Es ist u. a. in der Hütte tabelliert.

Damit findet man

$$\tau = \sqrt{\frac{T_a \sin \vartheta_n}{\omega}} K\left(\frac{\vartheta_{max}}{2}\right) \quad (16)$$

Dabei hängt ϑ_{max} gemäss (8) in Verbindung mit (2) nur von η und ϑ_n ab.

In Fig. 4 ist (16) für $\vartheta_n = 30^\circ$ und $\vartheta_n = 60^\circ$ je für $T_a = 5$ und $T_a = 10$ s ausgewertet. τ hängt wenig von η ab und schwankt zwischen 0,12 und 0,3 s, entsprechend einer totalen Schwingungsdauer $T = 4\tau$ von 0,48...1,2 s.

Man kann

$$K\left(\frac{\vartheta_{max}}{2}\right)$$

angenähert schreiben (Hütte)

$$K \cong \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \vartheta_{max}/2 \right\} \quad (17)$$

Aus (8) folgt überdies

$$\sin \vartheta_{max} = \eta \sin \vartheta_n$$

und daraus nach bekannter trigonometrischer Formel

$$\sin \frac{\vartheta_{max}}{2} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + \eta \sin \vartheta_n} - \sqrt{1 - \eta \sin \vartheta_n} \right\} \quad (18)$$

Setzt man (18) in (17) ein, so folgt aus (16) die Näherung

$$\tau = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T_a \sin \vartheta_n}{\omega}} \left\{ 1 + \frac{1}{8} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \eta^2 \sin^2 \vartheta_n} \right\} \right\} \quad (19)$$

Wenn man voraussetzt, dass das Polrad harmonische Schwingungen um die Nullage ausführt, dann erhält man den Ausdruck vor der Klammer in (19) als den vierten Teil einer ganzen Schwingung. Der Ausdruck in der Klammer ist daher ein Korrekturfaktor, der auftritt, weil bei grösseren Anschlägen die Polradschwingungen nicht mehr sinusförmig sind.

In Fig. 3 und 4 ist das Ergebnis der Rechnung graphisch aufgetragen. Aus Fig. 3 ersieht man, dass für Aggregate mit Anlaufzeitkonstanten von $T_a = 10$ s bei Zulassung eines Leistungsstosses entsprechend Nennlast eine Frequenzdifferenz von 0,9...1,6 % und bei $T_a = 5$ s eine solche von 1,3...2,2 %, je nach Nennlastwinkel zulässig ist. In Fig. 4 ist die Zeit angegeben, die für die Ausbildung des maximalen Leistungswertes nötig ist. Man sieht, dass der Vorgang stossartig ist.

Die nun vorliegenden zwölfjährigen Erfahrungen mit solchen Einrichtungen zeigten aber, dass grössere Frequenzdifferenzen als 1...1,2 % nicht zugelassen werden können. Dabei handelt es sich aller-

dings um Einrichtungen von ca. 35 MVA. Für ganz kleine Maschinen trifft die erwähnte Feststellung nicht zu, dort kann aber meistens bei noch grösserer Differenz als 2 % und sogar überhaupt ohne Rücksicht auf die Frequenzdifferenz mit reduzierter Erregung der Generator zugeschaltet werden, was von einer ganz einfachen Apparatur erwirkt werden kann.

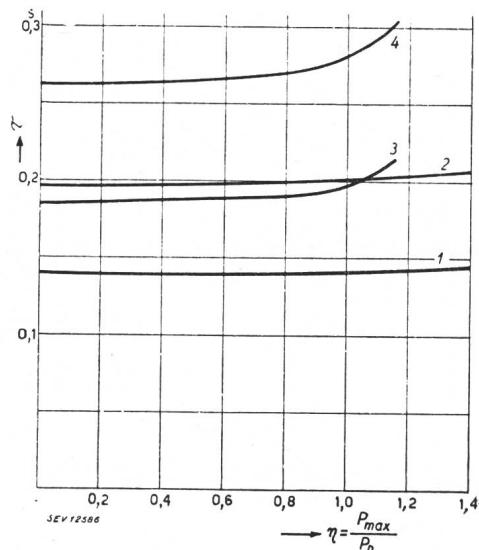


Fig. 4.
Zeitpunkt des Auftretens des maximalen Leistungsstosses
1...4 Zeit τ vom Momente des Zusammenschaltens bis zum
Auftritt der Spitze der Ausgleichsleistung in Funktion
der zugelassenen grössten Ausgleichsleistung
1 und 2 für $\vartheta_n = 30^\circ$; 1 für $T_a = 5$ s; 2 für $T_a = 10$ s;
3 und 4 für $\vartheta_n = 60^\circ$; 3 für $T_a = 5$ s; 4 für $T_a = 10$ s.

Beim Kuppeln von Netzen sind es meistens die charakteristischen Werte der Kupplung, welche den zulässigen Leistungsstoss begrenzen. Namentlich deren ohmscher Widerstand führt bei verhältnismässig kleinen Laststössen zur Anfachung von gefährlichen Pendelungen der Kuppelleistung. Diese Verhältnisse sind meistens deshalb ungünstig, weil die Kuppelleitungen für eine wesentlich geringere Leistung dimensioniert sind als die beidseitig geschlossenen Werke aufweisen; der Leistungsstoss ist aber durch die Stärke dieser Kraftwerke bestimmt. Bei der Wahl der Schutzrelais für die Kuppelleitung bzw. bei deren Erstellung ist darum auf diese Verhältnisse Rücksicht zu nehmen. Bei Gross-Generatoren bedeutet ein Leistungsstoss entsprechend Nennlast z. B. in Grössenordnung von 35 000 kW, wie erwähnt, ganz andere Auswirkungen auf die geschlossenen Netze als etwa der Nennlaststoss einer Maschine von wenigen kVA.

Die Einregulierung einer zuzuschaltenden Maschine auf eine Frequenzdifferenz von $\varepsilon = \pm 1\%$ wird heute von jedem modernen Turbinenregler ohne Schwierigkeiten ermöglicht, und zwar durch Einwirkung auf denselben von Hand oder automatisch. Nur beim Kuppeln von Netzen fällt dieser Vorgang ausser Betracht, weil gewöhnlich keine Möglichkeit besteht, auf die Turbinensteuerung einzuwirken. Dort ist aber die zulässige Frequenzdifferenz mit Rücksicht auf das vorstehend Gesagte bezüglich Kuppelleitung begrenzt.

Die Beobachtungen im praktischen Betriebe zeigen auch, dass sich die Frequenzschwankungen des gestörten Netzbetriebes oder die durch die ungünstige Leerlaufstabilität gewisser Turbinen bedingten Drehzahl-Pendelungen in diesen Grössen halten.

Der Zeitgewinn, der bei Erhöhung der Frequenzdifferenz auf $\pm 2\%$ erreicht werden könnte, würde die damit bedingte Erhöhung der Leistungsstösse durchaus nicht lohnen. Selbstverständlich soll die zuzulassende Frequenzdifferenz nicht durch die Eigenschaften der Schnellparallelschaltapparaturen eingeschränkt sein, was grundsätzlich leicht zu erreichen ist, sondern nur durch die geschilderten Vorgänge bezüglich Rückwirkung des Leistungsstosses auf die *damit beanspruchten Maschinenteile und Netze*. Die Anpassung des Vorgabewinkels an die Einschaltzeit der Schalter ist mit Rücksicht auf das Gesagte ebenfalls beschränkt, woraus sich ergibt, dass es zwecklos ist, Apparaturen mit allzu hohen Vorgabewinkeln auszubilden. Entscheidend ist, dass diese robust und frei von Temperatur- und Fremdspannungseinflüssen sind, um jeweilen während der kurzen Aktionsdauer einwandfrei funktionieren zu können.

Schliesslich sei noch auf eine Anwendungsmöglichkeit der Schnellsynchronisierung hingewiesen,

die besonderes Interesse verdient. An Stelle eines synchronisierten Anwurfmotors zu grossen Synchron-Gruppen kann ein gewöhnlicher Asynchron-Anwurfmotor von gleicher Polzahl wie die Synchronmaschine verwendet werden und an Stelle des Erregers zwecks Synchronisierung des Rotors der Anwurfmachine das sichere Parallelschalten der Synchronmaschine mittels einer Schnellsynchronisierung erreicht werden. Bei Verwendung eines Anwurfmotors mit gleicher Polzahl erübrigts sich jegliche Frequenzabgleich-Vorrichtung bestehend aus Differentialreglern und dergleichen. Mit Rücksicht auf die sichere Synchronisierung sind diese Anwurfmotoren derart ausgelegt, dass ihr maximaler Schlupf innerhalb der Werte liegt, die ohne weiteres von der Schnellsynchronisierung erfasst werden können, d. h. dieser Schlupf beträgt weniger als $1,2\%$. Eventuell auftretende Veränderungen der Leerlaufverluste und damit des Schlupfes des Anwurfmotors werden von der Schnellsynchronisierung selbsttätig berücksichtigt. Auch dieser Fall ist bereits mit Vorteil praktisch verwirklicht worden an einer Frequenz-Umformer-Gruppe, bestehend aus einem Haupt-Maschinensatz von $2 \times 25\,000$ kVA.

Adresse der Autoren:

R. Keller, Hertensteinstrasse 21, Ennet-Baden;
W. Frey, Mellingerstrasse 140, Baden.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Untersuchung des Kondensator-Schweissverfahrens zur Erreichung hoher Zugfestigkeit der Schweissverbindung bei hartgezogenen Aluminiumdrähten

[Nach Gottfried Höhme, Arch. f. Elektrotechn., Bd. 34 (1940), Nr. 8, S. 425...445]

621.791 : 621.315.53
621.791.76 : 621.319.4

In der gemeinsamen Sitzung vom 10. Mai 1944 behandelten die Fachkollegien 7 und 11 des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees das Schweissen von Einzeldrähten an Freileitungssseilen. Dabei wurde auf das von G. Höhme beschriebene Kondensator-Schweissverfahren hingewiesen und angezeigt, dieses Verfahren zu erproben.

Aus dem ausführlichen Aufsatz von G. Höhme drucken wir folgende besonders interessanten Abschnitte ab.

Uebersicht. Nach eingehender Untersuchung des Erwärmungs- und Stauchvorganges werden für das Schweissen mittels Kondensatorentladung Richtlinien für den Aufbau des elektrischen und mechanischen Teiles des Schweissgerätes und für dessen zweckmässige Einstellung beim Schweissen von harten Aluminiumdrähten gegeben.

Die bisherigen Erfolge bei der Schweissung von Aluminiumdrähten nach dem Kondensatorverfahren

Das Schweissen dünner Drähte mittels Kondensatorentladung¹⁾ hat für die Verbindung von Kupfer-, Eisen- und Konstantandrähten und besonders für hochhitzebeständige Legierungen — wie Chromnickel-, Megapyr- und Kanthaldrähten — als Zweistufenverfahren²⁾ gute Festigkeitswerte ergeben. Die Schweissung dünner Aluminiumdrähte konnte bisher nur bei kreuzweisem Uebereinanderlegen der Drähte

¹⁾ A. I. Neumann, Elektrische Widerstands-Schweissung und Erwärmung, S. 31. Berlin: Julius Springer 1927. — G. Renatus, Funktechn. Ber. (1934), S. 379. — Pat. Frankr. Nr. 583232 (VIII) 1924. Pat. Deutschland Nr. 264405 (21 h) 1912. — S. M. Popow, Awtogennoe delo 8 (1937), S. 21.

²⁾ O. Zdralek u. J. Wrana, ETZ Bd. 56 (1935), S. 579. — J. Wrana, ETZ Bd. 56 (1935), S. 991. L. Brune, Elektrowärme Bd. 8 (1938), S. 68.

durchgeführt werden, ein Fall, dem praktisch geringe Bedeutung zukommt. Vor allem aber war die bei solchen Aluminiumverbindungen erreichbare Zugfestigkeit unbefriedigend.

Heute liegt jedoch bei der vielseitigen Verwendung von Aluminium gerade das Bedürfnis vor, dünne Aluminiumleiter durch Schweissung miteinander oder mit anderen Metallen zu verbinden. So werden in der Elektrotechnik bei der Herstellung von Apparaten und Messgeräten Spulen aller Art, aber auch Leitungsdrähte aus Aluminium hergestellt, wobei die Drähte entweder miteinander oder mit anderen Metallen oder auch mit anderen Querschnitten einwandfrei verbunden werden müssen. Auch beim Ziehen dünner Aluminiumdrähte sind solche Schweissungen nötig. Darüber hinaus verdient aber auch das Verfahren selbst Aufmerksamkeit, das bereits bei der Fertigung von Elektrowärmegeräten zum Verschweissen von Drähten und Litzen aus hitzebeständigen Cr-Ni-Fe- und Cr-Al-Fe-Legierungen verwendet wird und dessen Anwendung beispielsweise für die Massenherstellung von Einschmelzdrähten aus Cu-Fe-Ni und ähnlichem für Glühlampen und Elektronenröhren usw. von der Industrie angestrebt wird.

Die Vorgänge bei der Schweissung mittels Kondensatorentladung werden deshalb allgemein genauer untersucht, um festzustellen, unter welchen Bedingungen bei Aluminium — und zwar bei hartgezogenen Drähten — hohe Festigkeit der Schweißstelle erreicht werden kann.

Versuche

Die Schlussfolgerungen aus theoretischen Ueberlegungen und Vorversuchen wurden durch Schweissversuche nachgeprüft. Die Versuche wurden in der Hauptsache der bequemen Handhabung wegen mit einem Querschnitt von $0,79 \text{ mm}^2$ durchgeführt. Dafür ergibt sich gemäss den drei festgelegten Bedingungen bei einer Kapazität von $2120 \mu\text{F}$ ³⁾ und mit der für die Versuchseinrichtung maximal möglichen Vorschubgeschwindigkeit von 87 cm/s und für einen ohmschen Widerstand von etwa $0,16 \Omega$ nach Diagramm Fig. 1 eine Kondensator-Mindestspannung von 80 V. Die Zeit

³⁾ Elektrolyt-Kondensatoren $30 \cdot 80 \mu\text{F}$.