

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 25 (1934)
Heft: 2

Artikel: Die Regulierprobleme beim praktischen Betrieb mit Frequenzumformern
Autor: Keller, Rob.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056534>

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: 05.02.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:

S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

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

XXV^e Année

N^o 2

Vendredi, 19 Janvier 1934

Die Regulierprobleme beim praktischen Betrieb mit Frequenzumformern.

Von Rob. Keller, Ennetbaden.

621.314.26

Nachdem das Problem der elastischen Netzkupplung mit rotierenden Umformern seit längerer Zeit theoretisch gelöst war, wird im vorliegenden Artikel über die neueste Entwicklung und über die Betriebsresultate berichtet. Dank der in letzter Zeit erreichten bedeutenden Fortschritte im Bau und Betrieb von Dreiphasen-Kommutatormaschinen wurde es möglich, auch diese elektrische Maschinengruppe für den praktischen Betrieb vollkommen betriebssicher zu gestalten. Es wird gezeigt, wie durch Einbau einer sinngemäss durchgebildeten automatischen Leistungs- und Frequenzregulierung die Gruppen vorteilhaft komplettiert werden. Diese Regulierung gestattet, die mannigfaltigsten Regulierprobleme eindeutig zu lösen und ist so durchgebildet, dass vor allem die Bedienung und auch das Verhalten der Gruppen bei Störungen grundsätzlich gleich sind, wie bei den üblichen Turbinenaggregaten.

Le problème du couplage élastique de réseaux à l'aide de machines rotatives étant théoriquement résolu depuis quelques années, l'intérêt se porte naturellement sur les derniers perfectionnements et les résultats d'exploitation obtenus avec ce mode de couplage. Grâce aux progrès importants réalisés dans la construction et le fonctionnement des machines triphasées à collecteur, il a été possible de réaliser une très grande sécurité dans l'exploitation de ces groupes qui peuvent être favorablement complétés par un dispositif savant de réglage automatique de la puissance et de la fréquence. Ce mode de réglage permet de résoudre clairement les problèmes de réglage les plus divers et est conçu de manière telle que, lors de perturbations, la commande et le fonctionnement de ces groupes soient en principe les mêmes que pour les groupes turbine-alternateur normaux.

Einleitung.

Ueber die prinzipielle Arbeitsweise von Frequenzumformern zwecks Ermöglichung des Leistungsaustausches zwischen unabhängigen Netzen sind bereits einige Publikationen erschienen ¹⁾.

Da in den letzten Jahren eine Anzahl solcher Umformer mit gutem Erfolg im In- und Auslande dem praktischen Betriebe übergeben worden sind, soll versucht werden, über die seither eingetretene weitere Entwicklung dieser interessanten elektrischen Maschinengattung im Zusammenhang mit den aufgetretenen Regulierproblemen zu berichten. In bezug auf den praktischen Betrieb sind die Verhältnisse und die Forderungen, die an die Umformer gestellt werden müssen, verschieden, je nachdem die Gruppe zur Kupplung zweier Netze der Allgemeinversorgung (im folgenden kurz «Industrienetze» genannt) oder eines Industrienetzes mit einem Bahnnetz bestimmt ist. Im ersten Fall handelt es sich gewöhnlich um Kupplung zweier Drehstromnetze, während bei der Verbindung mit einem Bahnnetz die Drehstrom-Drehstrom- und die Drehstrom-Einphasen-Umformung in Betracht fallen.

«Industrie-Umformer» werden namentlich in Werken aufgestellt, die zwei Netze verschiedener Frequenz betreiben, wobei die Kraftwerke des Netzes mit abnormaler Frequenz, z. B. 42 Per./s, voll ausgenutzt sind, der Bedarf an Leistung aber wei-

ter steigt. In solchen Fällen muss zwischen folgenden drei Varianten gewählt werden:

1. Vollständiger Umbau des Netzes mit abnormaler Frequenz auf Normalfrequenz $f = 50$ Per./s.
2. Verstärkung der bestehenden Kraftwerke, also Aufstellung weiterer Aggregate mit abnormaler Frequenz.
3. Aufstellung eines Frequenz-Umformers, welcher gestattet, die fehlende Leistung bzw. die Reserveleistung aus dem leistungsfähigeren, normalfrequenten Netz zu beziehen.

Oft erweist sich die dritte Variante als die vorteilhafteste. Hauptbetriebsbedingung für diese Umformer ist der Bezug bzw. die Abgabe einer konstanten, durch die Betriebsverhältnisse bedingten, einstellbaren Leistung. Die durch die Wirkungsweise der elastischen Frequenz-Umformer sich ohne weiteres ergebenden weiteren Leistungsübertragungen in Abhängigkeit der Frequenz des einen oder anderen Netzes, oder in Funktion der Frequenzdifferenz, sind weniger wichtig. Mit Rücksicht auf die Primärmaschinen der Generatoren in Walzwerken, welche vorwiegend aus mit Abgasen betriebenen Gasmotoren bestehen, ist die Betriebsart mit frequenzabhängiger Leistung schwieriger durchführbar wegen den damit verbundenen Leistungsvariationen, welche ihrerseits die Ausnützung des Brennstoffes sehr unübersichtlich gestalten.

Beim Bahnnumformer variieren die Verhältnisse je nach dem Aufstellungsort. Wenn ein oder mehrere Frequenzumformer zwischen ein Industrie- und

¹⁾ Siehe z. B.: F. Grieb, Leistungsaustausch zwischen unabhängigen Leitungsnetzen. Bull. SEV 1929, Nr. 10, S. 281.

Bahnnetz eingeschaltet werden, mit im Verhältnis zur Nennleistung der Bahnkraftwerke sehr geringer Leistung, so wird auch hier vorwiegend die Uebertragung von konstanten Leistungen im Vordergrund stehen, da ja in diesem Falle der Umformer nicht in der Lage ist, die Frequenz des Bahn- oder Industrienetzes wesentlich zu beeinflussen. Weist der Frequenzumformer dagegen eine Nennleistung auf, die im Verhältnis zu der Totalleistung der Bahnkraftwerke von Bedeutung ist, so ergibt sich die Notwendigkeit, den Umformer mit einer den Bahnkraftwerkgeneratoren ähnlichen Charakteristik betreiben zu können. Der Betrieb mit konstanter Leistung könnte in diesem Falle unter Umständen sogar unangenehme Folgen haben, wie sich aus den nachstehenden Erwägungen ergibt.

Angenommen, die Bahn beziehe über den Frequenzumformer eine konstante Leistung und die vom Bahnnetz aufgenommene Leistung sinke vorübergehend unter diese vom Umformer abgegebene Leistung, dann würde die Bahnfrequenz augenblicklich hochgetrieben, bis die entsprechenden Schutzorgane die Abschaltung der Umformer oder des gesamten Bahnnetzes hervorrufen würden. Noch kritischer werden die Verhältnisse, wenn die Lokomotiven mit Rekuperationseinrichtungen ausgerüstet sind. Es folgt daraus, dass die vollkommen unabhängige Uebertragung von konstanten Leistungen an ein Bahnnetz nicht ohne weiteres zulässig ist. Dazu kommt noch der Umstand, dass bei Speisung einer Drehstrombahn die Bahnfrequenz in engen Grenzen gehalten werden muss, weil in erster Linie die Frequenz die Wirkungsweise der Drehstrom-Induktionsmotoren bestimmt. Im Gegensatz dazu spielt bei Einphasen-Bahnen die Frequenz für die Kollektormotoren eine nebensächliche Rolle.

I. Schaltung der Kommutator-Kaskade für konstante Leistung innerhalb des Regelbereiches.

Unter Hinweis auf die Literatur ²⁾ sei im folgenden die prinzipielle Wirkungsweise der Kommuta-

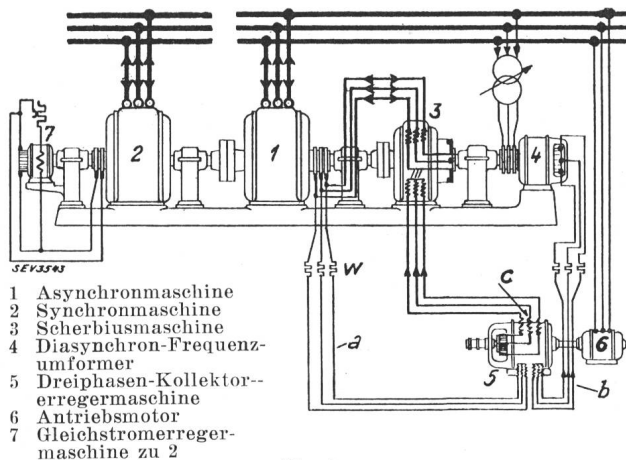


Fig. 1.

Schaltung der Kommutatorkaskade für konstante Leistung.

²⁾ Dr. Seiz, Archiv für Elektrotechnik 1928, Heft 3; E. u. M. 1928, Heft 35, 36, 37; Grieb, Bull. SEV 1929, Heft 10; Santuari, Energia Elettrica 1929, usw.

torkaskade für konstante Leistung kurz wiedergeben. Der in Fig. 1 dargestellten Schaltung liegt folgender Gedanke zugrunde: Die Drehzahl der Gruppe ist durch die Synchronmaschine bzw. durch die Frequenz des diese speisenden Netzes gegeben. Die an den Schleifringen der Asynchronmaschine entstehende Spannung E_s ist gleich

$$E_s = E_{Rot.} \cdot s$$

$$s = \text{Schlupf} = \frac{n - n_1}{n}$$

$E_{Rot.}$ = Rotor-Stillstandsspannung
 n = synchrone Drehzahl der Asynchronmaschine.
 n_1 = wirkliche Drehzahl der Asynchronmaschine.

Bei konstantem Rotorwiderstand ist auch der Rotorstrom proportional der Rotorspannung und folglich auch die Leistung. Der Verlauf der zwi-

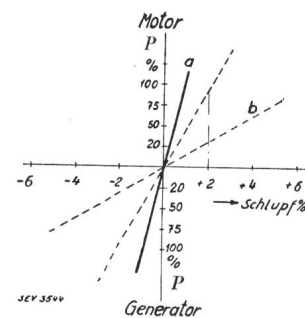


Fig. 2.

Verlauf der Leistung eines Asynchron-Synchron-Umformers in Funktion des Schlupfes.

- a Leistung bei min. Rotorwiderstand.
- b Leistung bei erhöhtem Rotorwiderstand.

schen zwei Netzen über einen Synchron-Asynchron-Umformer zirkulierenden Leistung in Abhängigkeit der an den Schleifringen des Asynchronmotors entstehenden Schlupfspannung würde deshalb nach Fig. 2 verlaufen.

Der Anschluss der Kommutator-Hintermaschine (Scherbiusmaschine) an die Schleifringe der Asynchronmaschine bezweckt zunächst die Einführung einer der Rotorspannung proportionalen und entgegengerichteten Spannung; d. h. die Hintermaschine erzeugt eine frequenzgleiche, aber entgegengerichtete Rotorspannung. Dadurch wird die an den Schleifringen vom Hauptfeld der Asynchronmaschine induzierte Spannung aufgehoben. Unter diesen Umständen kann aber im Rotorkreis auch kein Strom fließen und demzufolge die Asynchronmaschine auch kein Drehmoment entwickeln. Es ist damit zunächst erreicht, dass eine solche Gruppe innerhalb des durch die Leistungsfähigkeit der Kommutatorkaskade bedingten Schlupfbereiches vollkommen elastisch arbeitet, und zwar mit Leistung 0. Die Erzwingung einer Leistungsübertragung zwischen den beiden Netzen geschieht nun sehr einfach dadurch, dass die Rotor-Gegenspannung der Scherbiusmaschine zusätzlich weiter beeinflusst wird, und zwar derart, dass die Rotorspannung nicht mehr in jedem Moment aufgehoben, sondern je nach dem verlangten Drehmoment über- oder unterkompensiert wird.

Die Kommutatorkaskade erfüllt demnach zwei Hauptfunktionen:

1. Erzeugung einer der Rotorspannung der Hauptmaschine proportionalen Gegenspannung.

2. Erzeugung einer weiteren beliebig einstellbaren Zusatz-Rotorspannung, welche allein das von der Hauptmaschine verlangte Drehmoment bestimmt.

Die erstgenannte Spannung wird durch den Erregerkreis *a* hervorgebracht. Die betreffende Erregerwicklung ist über einen Widerstand *w* direkt an die Hauptschleifringe angeschlossen. Die Proportionalität des Erregerstromes in bezug auf die Rotorspannung wird dadurch erreicht, dass der induktionsfreie Widerstand den induktiven Widerstand dieses Kreises stark überwiegt.

Die Zusatzspannung wird durch eine zweite separate Erregerwicklung *b*, welche ebenfalls mit Schlupffrequenzstrom erregt sein muss, erzeugt. Dieser wird durch den auf der Hauptwelle sitzenden Frequenzwandler 4 geliefert, dessen Aufbau und Wirkungsweise kurz beschrieben seien: Der Rotor besitzt eine Gleichstromwicklung, welche wie beim Einankerumformer einerseits mit einem Kommutator und andererseits an drei um 120° el. versetzten Stellen mit drei Schleifringen verbunden ist. Auf dem Kommutator schleifen ebenfalls drei um 120° el. verschobene Bürstenreihen. Die drei Schleifringe werden vom Netz der Asynchronmaschine gespeist, wodurch ein Drehfeld entsteht, welches gegenüber dem Rotor, unabhängig von dessen Drehzahl, mit einer der Netzfrequenz und Polzahl des Frequenzwandlers entsprechenden Winkelgeschwindigkeit rotiert. Die an den Kommutatorbürsten entstehende Spannung ist dem Effektivwert nach gleich wie die der speisenden Wechselfspannung an den Schleifringen, weil zwischen den Kommutatorbürstenreihen immer gleichviel Windungen liegen wie zwischen den Schleifringanschlusspunkten. — Die Frequenz der an den Kommutatorbürsten entstehenden Spannung ist bestimmt durch die Raumgeschwindigkeit des Drehfeldes. Dreht der Rotor entgegengesetzt der Richtung dieses Drehfeldes und mit einer Geschwindigkeit, welche der synchronen Drehzahl entspricht, so steht das Feld im Raume still. In diesem Falle entsteht an den Kommutatorbürsten ein Gleichstrom, also gleich wie beim Einankerumformer. Weicht die Drehzahl von der synchronen ab, so entsteht an den Kommutatorbürsten ebenfalls eine Dreiphasenspannung, deren Frequenz genau der Schlupffrequenz der Asynchronmaschine entspricht, da bei Stillstand des Rotors sowohl an den Schleifringen des Asynchronmotors, als auch an den Kommutatorbürsten die gleiche, d. h. die Netzfrequenz entsteht. Steigt die Drehzahl über den synchronen Wert, so ändert sich auch die Drehrichtung des Drehfeldes an den Kommutatorbürsten entsprechend demjenigen an den Schleifringen der Hauptmaschine.

Aus dem Gesagten ist leicht einzusehen, dass die angegebene Schaltung den eingangs erwähnten Grundgedanken nur dann erfüllt, wenn die von der Hintermaschine abgegebene Spannung genau proportional der diesen zugeführten Erregerströmen ist.

Wird die Hintermaschine nicht direkt, sondern über einen Zwischenerreger erregt, so muss selbst-

verständlich auch dieser vollkommene Proportionalität zwischen Erreger- und Ankerstrom aufweisen; d. h. der Erreger muss sich gleich verhalten wie ein statischer Stromwandler, wobei aber das Uebersetzungsverhältnis auch bei Synchronismus, d. h. bei Frequenz 0, also bei Gleichstrom, konstant bleiben muss. Ohne besondere Disposition der Schaltung der Erreger- und Hintermaschine, d. h. bei einfacher Dreiphasen-Erregermaschine ohne die Reihenschlusswicklungen *c*, würde die Ankerspannung der Hintermaschine nicht proportional der durch die beiden Erregerwicklungen gegebenen Durchflutung verlaufen, da der Strom im Ankerkreis der Erregermaschine hauptsächlich durch den Blindwiderstand der Erregerwicklung der Hintermaschine gegeben ist, welcher mit wechselnder Schlupffrequenz ändert. Die Reihenschlusswicklung ist als Gegenkompoundwicklung geschaltet und wird so stark gewählt, dass die dadurch im Anker entstehende Gegen-EMK einen vielfachen Wert der EMK darstellt, welche der Belastungskreis des Ankers erfordert. Die Wirkung der beiden andern Erregerwicklungen muss daher so stark sein, dass sie die Gegenwirkung der Reihenschlusswicklung aufhebt und dazu ein Feld erzeugt, welches im Anker eine Spannung entsprechend dem gesamten Spannungsabfall des Ankerstromes ergibt. Wenn diese Spannung gegenüber der durch die Reihenschlusswicklung erzeugten Gegen-EMK vernachlässigt werden kann, so wird auch die Wirkung der beiden Erregerwicklungen dem Werte nach direkt angenähert gleich der Wirkung der Reihenschlusswicklung, d. h. der Erregerstrom ist proportional dem Ankerstrom und unabhängig von der ändernden Schlupffrequenz. Auch die Hintermaschine 3 ist mit einer kräftigen Reihenschlusswicklung ausgerüstet, derart, dass die von ihr er-

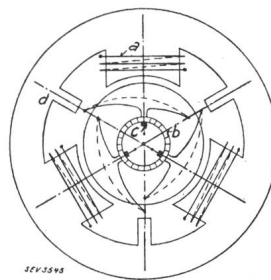


Fig. 3.

Schematische Darstellung der Scherbiusmaschine.

- a* Hauptpole.
- b* Rotor.
- c* Bürsten.
- d* Hilfspole.

zeugte Rotorspannung diejenige Spannung, welche zur Deckung des Spannungsabfalles im Ankerkreis erforderlich ist, um ein Vielfaches übersteigt. Die starke Wirkung der Seriewicklung verleiht der Scherbiusmaschine ein ähnliches Verhalten wie ein grosser Widerstand im Ankerkreis; dadurch wird auch der Einfluss des variablen Bürstenübergangswiderstandes am Kollektor auf den Wert des Ankerstromes praktisch vollständig eliminiert.

Die Dreiphasen-Kollektormaschinen, d. h. die Hinter- und die Erregermaschinen, sind nach dem Scherbiusprinzip gebaut. Dieses stellt eine besondere Art der Dreiphasen-Kollektormaschinen dar und ist charakterisiert durch den auf 120° el. ver-

kürzten Wicklungsschritt im Stator und im Rotor. Im Gegensatz zur Gleichstrommaschine ist die Polzahl immer ein Mehrfaches von 3. Der prinzipielle Aufbau dieser Maschine ist in Fig. 3 dargestellt. Im übrigen sei auf die diese Maschinen betreffende Literatur verwiesen³⁾.

Die beschriebene Verbindung des Hauptmotors mit einer Kommutatorkaskade gestattet nicht nur die willkürliche Einstellung jeder beliebigen Wirklast unabhängig vom Schlupf, sondern auch der Blindlast. Die Erzeugung der Blindlast erfolgt durch Speisung der Fremderregung der Erregermaschine durch einen um 90° phasenverschobenen

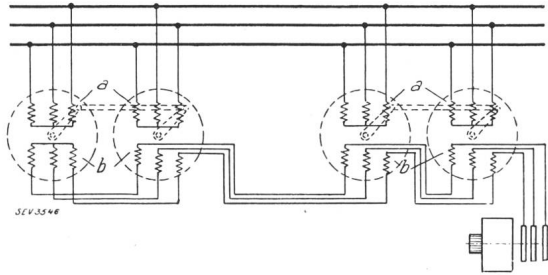


Fig. 4.
Schaltung der Wirk- und Blindlast-Doppelinduktionsregler.
a Statorwicklungen.
b Rotorwicklungen.

Strom gegenüber dem, der zur Bestimmung der Wirklast dient.

Statt zwei getrennte Erregerwicklungen zu verwenden, die vom gemeinsamen Frequenzwandler gespeist werden und die zwecks Erreichung der 90°-Verschiebung z. B. in Stern und in Dreieck geschaltet sein können, wird heute gewöhnlich nur eine Erregerwicklung für die Einstellung der Wirk- und Blindlast verwendet. Die Speisung erfolgt dabei durch zwei um 90° verschobene Ströme über Induktionsregler (Fig. 4). Diese sind als Doppelregler geschaltet, damit die Phasenlage des regulierten Stromwertes in jeder Stellung des Reglers unverändert bleibt.

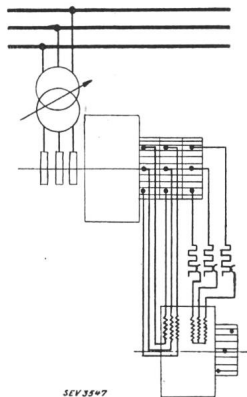


Fig. 5.
Schaltung des Frequenzwandlers bei Regelung durch Bürstenverschiebung.

nach Grösse und Richtung. Die dritte Bürstenreihe dient zur Speisung der Blindlasterregerwicklung über einen Einstellwiderstand. Die Induktionsreglersteuerung hat sich in der Praxis bestens be-

währt, da sie ein stufenloses Regulieren gestattet und gar keine elektrisch abnützenden Teile enthält. Der Kraftbedarf ist sehr gering, der Antrieb sehr einfach ohne Zwischengestänge und weist darum in der Steuerung auch keinen unerwünschten toten Gang auf. Mit Rücksicht auf das günstigere Verhalten des Frequenzwandlers werden die Regulier-Induktionsregler vor ihm, also direkt an die Netzseite angeschlossen.

Aus dem Gesagten ergibt sich die grosse Einfachheit des Betriebes eines derartig geschalteten Umformers, indem z. B. die gewünschte Leistung ganz einfach durch Einstellung eines bestimmten Erregerstromes im Zusatzerregerkreis der Kommutatorkaskade erfolgt. Die Leistung bleibt dabei vollkommen konstant, solange die Schlupffrequenz die Werte nicht überschreitet, welche für die Dimensionierung der Kaskade massgebend waren. Auch der absolute Wert der beiden Netzfrequenzen hat in den praktisch möglichen Abweichungen keinen Einfluss auf die eingestellte Leistung. Einzig die Netzspannung desjenigen Netzes, an welches die Asynchronmaschine angeschlossen ist, beeinflusst die Leistung, die sich quadratisch mit der Netzspannung ändert.

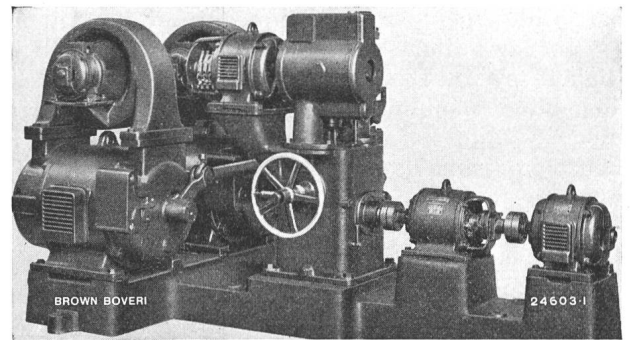


Fig. 6.
Regulieraggregat mit Induktionsregler.

Neben der Forderung auf Uebertragung von konstanten Leistungswerten verlangt besonders der Bahnnumformer, wie eingangs erwähnt, die Uebertragung von Leistungswerten als Funktion der Frequenz des einen oder andern Netzes, in den meisten Fällen in Abhängigkeit der Bahnfrequenz. Auch diese Art der Leistungsumformung lässt sich mit dieser Schaltung grundsätzlich sehr einfach ausführen. Die Einstellung des die Leistung eindeutig bestimmenden Erregerstromes der zweiten Erregerwicklung (b in Fig. 1) hat einfach in Abhängigkeit eines frequenzempfindlichen Organes, z. B. eines Fliehkraftreglers, welcher synchron von dem Netz angetrieben wird, dessen Frequenz die Leistung bestimmen soll, zu erfolgen. Fig. 6 zeigt die konstruktive Ausbildung einer derartigen Reguliereinrichtung, wobei ein Fliehkraftpendel mit Servomotor eine Doppel-Induktionsreglergruppe für die Einstellung der Wirklast steuert. Fig. 7 zeigt die praktische Ausführung der Reguliereinrichtung für den gleichen Zweck, der aber durch Einstellung des Er-

³⁾ Siehe z. B. Scherbius, ETZ 1911, S. 931.

regerstromes durch Verstellen der Bürsten am Frequenzwandler erreicht wird.

Eine dritte Regulierbedingung, die Leistungsregulierung in Abhängigkeit der Frequenzdifferenz, bzw. in Abhängigkeit des Schlupfes, lässt sich ebenfalls auf einfachste Art durch Verstellen des Wider-

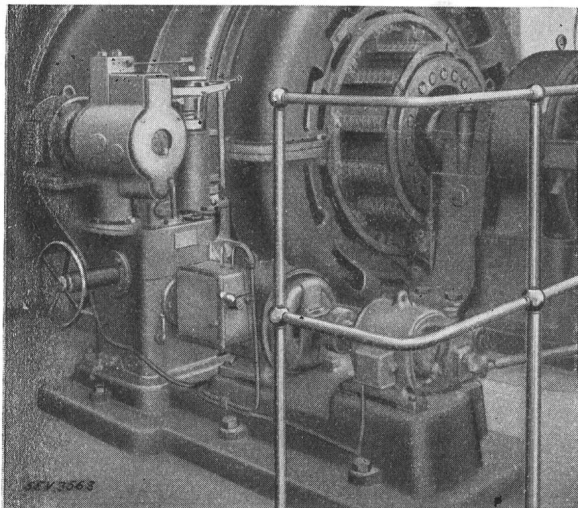


Fig. 7.
Regulieraggregat für die Bürstenverstellung.

standes im Widerstandserregerkreis erreichen. Die Einstellung des Leistungsnullpunktes, d. h. die Wahl des Schlupfwertes, bei welchem die Leistung den Wert 0 aufweisen soll, erfolgt hier durch Einstellung des Erregerstromes in der zweiten Erregerwicklung (*b* in Fig. 1), wogegen die Neigung der Leistungskurve durch die Einstellung des Widerstandskreises (*a* in Fig. 1) gegeben ist.

Die mit dieser Schaltung bzw. mit der Autoregulierung der Kommutatorkaskade erhaltenen praktischen Resultate waren in mehreren praktischen

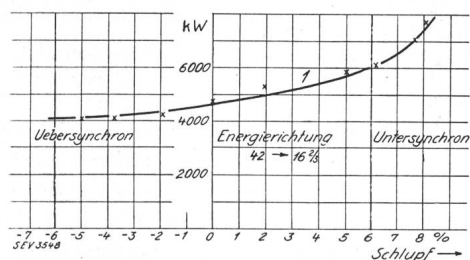


Fig. 8.
Verlauf der Leistung in Funktion des Schlupfes einer Frequenzumformergruppe mit Autoregulierung.

Fällen durchaus befriedigend, wo nicht sehr hohe Anforderungen bezüglich Genauigkeit über den ganzen Schlupfbereich der Gruppe gestellt waren. Die in Fig. 8 dargestellte Leistungskurve in Abhängigkeit des Schlupfes zeigt das Resultat einer nach dieser Schaltung arbeitenden Gruppe. — Die Abstimmung der Kommutatorkaskade zwecks Erreichung eines beliebigen konstanten Leistungswertes, unabhängig vom Schlupf, verlangte mitunter die Ueberwindung nicht unerheblicher Schwierigkeiten, namentlich mit Rücksicht auf gewisse Selbsterregungserscheinungen, zu denen solche Maschinen bekannt-

lich besonders leicht neigen. Andererseits tauchten Leistungsregulierungsprobleme auf, welche durch besondere Verhältnisse des Aufstellungsortes gegeben waren und welche unmöglich mit der reinen Autoregulierung der Gruppe erfüllt werden konnten. Auch die Einhaltung einer konstanten Blindlast unabhängig von Schlupf und Leistung war ohne Anwendung von Zusatzeinrichtungen nicht erreichbar. Diese Umstände und die während der Entwicklung dieser Umformer aufgestellten gesteigerten Forderungen hinsichtlich Genauigkeit, Ueberlastungsfähigkeit in Leistung und Schlupf waren ausschlaggebend für die Entwicklung einer einheitlichen Reguliermethode, mit welcher alle Regulierbedingungen restlos erfüllt werden können. Die Ausrüstung der Gruppen mit Zusatzreguliereinrichtungen bietet kein Risiko mehr, da auch auf diesem Gebiete in neuester Zeit Fortschritte bezüglich Betriebssicherheit und Handhabung gemacht wurden. Der Uebergang zu dieser Regulierart ergab zugleich die Möglichkeit, die Einstellung der Kommutatorkaskade jeweils auf die höchste Betriebssicherheit gegen Selbsterregungsgefahr zu erreichen, da keine Rücksicht mehr auf die Einhaltung der Leistungskonstanz, auf den Spannungseinfluss usw. genommen werden muss, indem nun diese Aufgaben von der Zusatzreguliereinrichtung übernommen werden.

II. Die Leistungsregulierung mit automatischen Reglern.

Die Wirkungsweise der automatischen Leistungsregulierung mit Zusatzregler ergibt sich ohne weiteres aus den bisherigen Ausführungen. Denn nachdem die Autoregulierung der Leistung durch die Schaltung selbst nicht mehr erreicht wird, fällt dem automatischen Leistungsregler die einfache Aufgabe zu, das Manko der Leistungskonstanz auszugleichen. Dies lässt sich erreichen, indem man den Leistungsregler so disponiert, dass er direkt oder indirekt die Zusatzregulierung jederzeit derart einstellt, wie es die Einhaltung der Leistungskonstanz erfordert. Die direkte Beeinflussung ist bei den beschriebenen Regulierorganen kaum möglich, weil sowohl bei Verwendung von Induktionsreglern, als auch bei der Bürstenverstellung am Frequenzwandler die nötigen Verstellkräfte zu gross sind. Es sind immerhin Schaltungen bekannt und ausprobiert worden, welche die direkte Regulierung gestatteten; da sie aber bis heute scheinbar keine praktische Verwendung fanden, wird hier nicht näher darauf eingetreten. Dagegen hat sich die indirekte Steuerung, wo der Leistungsregler das Regulierorgan (z. B. Induktionsregler) mit Servomotor verstellt, bewährt (Fig. 9).

Schwieriger stellte sich das Regulierproblem für den elektrischen Leistungsregler selbst. Der Regler muss selbstverständlich gestatten, jeden beliebigen Leistungswert und zwar nach Richtung und Grösse einzuhalten. Bekanntlich erfolgt bei den meisten Reglern die Einstellung des gewünschten Wertes der zu regulierenden Grösse durch eine Feder, welche

eine Kraft, bzw. ein Drehmoment liefert, das von dem unter dem Einfluss z. B. der Leistung stehenden elektrischen Organ überwunden werden muss. Der Forderung auf Uebertragung von beliebigen gewählten Leistungswerten könnte demnach ein automatischer Leistungsregler mit durch Feder,

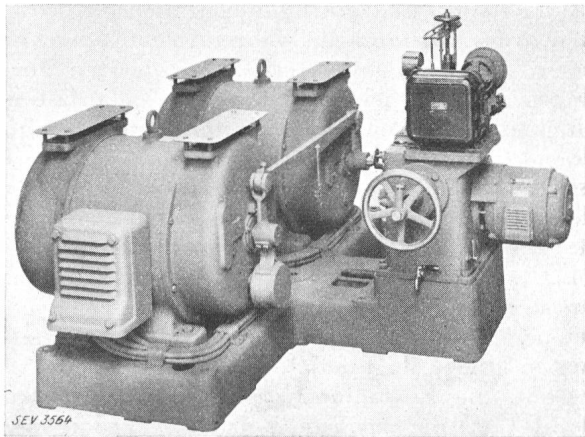


Fig. 9.

Wirklaststeuergruppe, bestehend aus Doppelinduktionsregler mit Servomotor und Leistungsregler.

bzw. mechanisch erzeugte Gegenkraft, vollauf genügen, da in diesem Fall der gewünschte Leistungswert jeweils willkürlich bestimmt wird und darnach die Federeinstellung vorzunehmen ist.

Bei der Erfüllung der weiteren Regulierbedingung, Uebertragung von Leistungswerten in Abhängigkeit des einen Netzes, würde aber diese mechanische Einstellung des Leistungsreglers zu beträchtlichen Schwierigkeiten führen, da hierfür zwei unter gegenseitigem Einfluss stehende Regler nötig sind, nämlich ein Einstellregler, der eine Eindeutigkeit

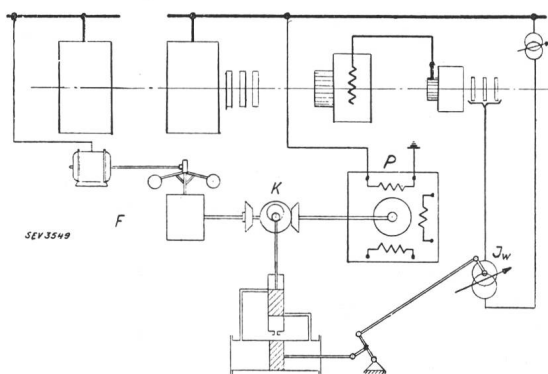


Fig. 10.

Umschaltbare Frequenz- und Leistungsregulierung.

- P Leistungsregler.
- F Frequenzregler.
- K Umschalt-Kupplung.
- J_w Wirklast-Induktionsregler.

der Frequenz des einen Netzes aufweist (z. B. Zentrifugalpendel) und ein Leistungsregler, der vom ersten die zu regulierenden Leistungswerte diktiert erhält. Die beiden Regler sind nötig, weil die Leistung eines Netzkupplungsformers durch Spannung, Frequenzdifferenz und Erregerstromstärke in den die Wirklast bestimmenden Wicklungen der

Kommutatorkaskade eindeutig bestimmt ist. Würde man daher bei Regulierung auf Leistung in Abhängigkeit der Frequenz des einen Netzes einfach den erwähnten Erregerstrom in Funktion dieser Frequenz regulieren, so wäre Eindeutigkeit der verlangten Funktion nur vorhanden, wenn die andere Frequenz unveränderlich wäre. In Fig. 10 ist die Anordnung der Reguliereinrichtung angegeben, bei welcher die Wirklast-Induktionsregler in einfacher Weise entweder von einem Leistungsregler oder von einem Drehzahlregler beeinflusst werden. Diese Schaltung liefert nur eindeutige Resultate bei Betrieb auf konstante Leistung. Bei Regulierung der Leistung in Funktion der Frequenz ist die Leistung aus dem angegebenen Grunde nicht eindeutig. Die Fälschung der Eindeutigkeit könnte nur dann vernachlässigt werden, wenn die Frequenzschwankungen des andern Netzes im Verhältnis zur gewünschten Statik, d. h. Leistungsänderung in Funktion der Frequenzänderung, sehr gering wären und dazu die Gruppe mit möglichst stark ausgebildeter Autoregulierung arbeiten könnte.

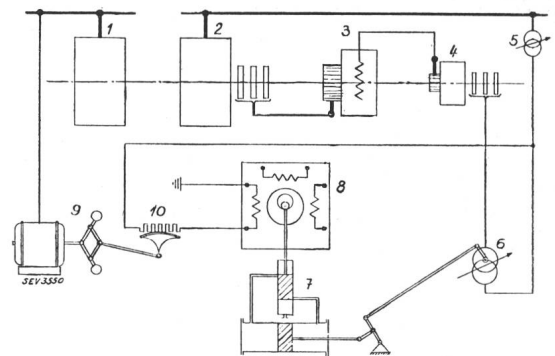


Fig. 11.

Prinzipielle Anordnung der schlupfunabhängigen Reguliereinrichtung.

- 1 Synchronmaschine.
- 2 Asynchronmaschine.
- 3 Kollektor-Hintermaschine.
- 4 Frequenzwandler.
- 5 Hilfswandler.
- 6 Doppel-Induktions-Regler.
- 7 Öl-Servomotor.
- 8 Leistungsregler.
- 9 Drehzahl-Pendel.
- 10 Einstellwiderstand zu 8.

Um die Regulierbedingung auf Leistungsänderung in Funktion der Frequenz des einen Netzes zu erfüllen, musste daher, wie angedeutet, ein Leistungsregler geschaffen werden, der in jedem Moment jeden beliebigen, nach Massgabe der herrschenden Frequenz bestimmten Leistungswert einzustellen vermag. Fig. 11 stellt schematisch die prinzipielle Anordnung des Leistungsreglers im Zusammenhange mit dem Einstellregler dar, bei welcher unter allen Umständen vollkommene Eindeutigkeit der Leistung in Funktion der Frequenz vorhanden ist. Anstelle der üblichen mechanischen Einstell-Gegenkraft wurde eine rein elektrische Einstellvorrichtung verwendet, dargestellt durch die Wicklung 8 (Fig. 12). Denkt man sich diese Wicklung 8 vorerst weggelassen, so ist die Schaltung identisch mit den bekannten Leistungsreglern, die mit einer Strom- und Spannungswicklung auf eine Ferrarisscheibe einwirken. Da in einer solchen Scheibe nur von den senkrecht aufeinanderstehen-

den Stromkomponenten der beiden Wicklungsströme ein Drehmoment entwickelt wird, so wirkt bei der getroffenen Schaltung mit Anschluss der Spannungswicklung über einen Vorschaltwiderstand an eine verkettete Spannung und mit der Strom-

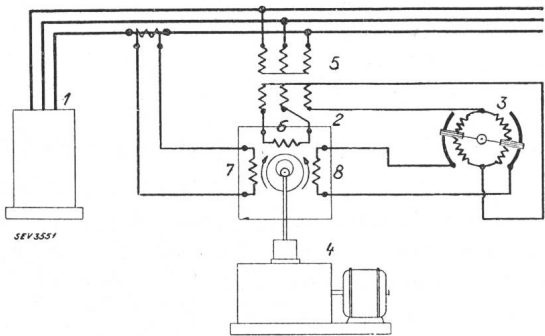


Fig. 12. Schaltung des Leistungsreglers.

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1 Hauptmaschine. | 5 Hilfstransformator. |
| 2 Leistungsregler. | 6 Spannungs-Wicklung. |
| 3 Potentiometer. | 7 Strom-Wicklung. |
| 4 Servomotor. | 8 Steuer-Wicklung. |

wicklung an die dritte Phase der Regler als Wattmeter. Wird nun das Wattorgan, wie angegeben, mit dem Servomotor bzw. mit dem Induktionsregler sinngemäss gekuppelt, so dass bei Drehung der Ferrarisscheibe entsprechend steigender Last der Induktionsregler im gegenteiligen Sinne, d. h. auf sinkende Last verstellt wird, so kommt die Reguliereinrichtung immer beim Leistungswert 0 zum Still-

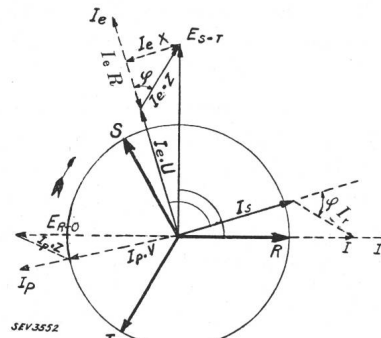
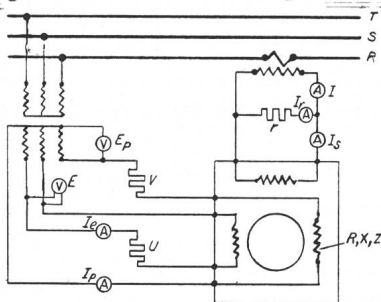


Fig. 13. Leistungsregler mit Stromdiagramm.

stand, weil dann in der Stromwicklung 2, welche vom Strom der Hauptmaschine beeinflusst wird, kein Wirkstrom fliesst. Aendert sich nun z. B. der Schlupfwert der Gruppe, so wird entsprechend ihrer natürlichen Charakteristik sofort eine Leistungsübertragung stattfinden, die bei einem sehr geringen Betrage das Ansprechen des Reglers zur

Folge hat. Die Ferrarisscheibe dreht sich wieder so lange, bis die Leistung auf Null zurückreguliert ist. Durch zweckmässige Anordnung der Wicklungen mit Nebenwiderständen ist dafür gesorgt, dass das Reguliersystem rein wattmetrischen Charakter aufweist und auf Blindströme gar nicht reagiert. Damit der Leistungsregler rein wattmetrischen Charakter aufweist, müssen bei induktionsfreier Belastung der den Regler speisenden Asynchronmaschine die beiden Ströme in der Strom- und in der Spannungswicklung des Reglers senkrecht aufeinanderstehen. In Fig. 13 ist das Stromdiagramm des Leistungsreglers dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass durch passende Abstimmung des dem Spannungskreis vorgeschalteten Widerstandes und eines parallel zur Stromwicklung eingeschalteten ebenfalls Ohmschen Widerstandes die beiden Ströme in der Spannungs- und Stromwicklung aufeinander senkrecht zu stehen kommen, wenn das Netz induktionsfrei belastet ist. Für den Fall, dass die beiden Wicklungen im Regler, von denen die eine von der Spannung und die andere vom Strom gespeist wird, genau gleich sind, wird

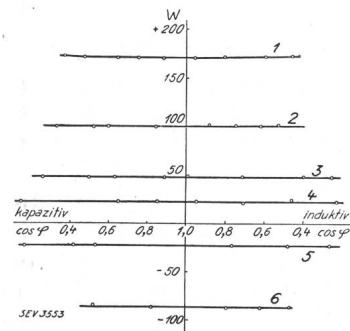


Fig. 13a. Regulierte Leistung in Abhängigkeit des Leistungsfaktors.

der Vorschaltwiderstand gleich dem Parallelwiderstand. Fig. 13a zeigt, dass die Leistungsregulierung vollkommen unabhängig vom Leistungsfaktor ist.

Die Einstellung des Leistungsreglers auf beliebige Werte erfolgt nun ganz einfach durch Speisung der Wicklung 8 (Fig. 12). Da dieser Strom einer Phasenspannung entnommen wird, in welcher auch der die Stromwicklung 7 speisende Stromwandler liegt, weist auch dieser gegenüber dem Erregerstrom der Spannungswicklung 2 ca. 90° Phasenverschiebung auf, wenn dieser Wicklung ebenfalls ein entsprechender Ohmscher Widerstand vorgeschaltet wird, und erzeugt in der Ferrarisscheibe Drehmomente, die diesem Strom direkt proportional sind, wenn die Spannung der Wicklung 6 konstant ist. Da nun, wie früher angegeben, die Polarität der Stromwicklung 7 derart gewählt sein muss, dass der Leistungsregler bei offener Wicklung 8 als Nullleistungsregler funktioniert, so wird sich bei Erregung der Wicklung 8 der Leistungsregler verstellen und die Kaskade soweit erregen, bis in der Stromwicklung 7 ein Wattstrom von gleicher Stärke wie in Wicklung 8 fliesst. Um die Umformerleistung nicht nur auf jeden beliebigen Wert einstellen zu können, sondern auch in beiden Richtungen, erfolgt die Erregung der Steuerwicklung 8 über ein Po-

tentiometer 3 (Fig. 12). Je nach Regulierart kann das Potentiometer von Hand auf jede beliebige Leistung oder auch automatisch, z. B. durch mechanische Kupplung mit einem Zentrifugalpendel in Abhängigkeit einer Frequenz eingestellt werden.

III. Der Einfluss der Netzspannung auf die Umformerleistung.

Diese Leistungsregulierung weist indessen noch eine Lücke auf, indem die Leistungskonstanz nur bei konstanter Spannung desjenigen Netzes, an welchem die Asynchronmaschine mit Kommutatorkaskade angeschlossen ist, innegehalten wird. Die Spannung des Netzes der Synchronmaschine hat auf die Leistung keinen Einfluss, solange diese Maschine in Tritt bleibt.

Bei der ursprünglichen Schaltung mit vollkommener Autoregulation variiert die vom Umformer übertragene Leistung annähernd quadratisch mit der Spannung, weil die den Wirkstrom der Asynchronmaschine bestimmende Erregung der Hintermaschine ebenfalls direkt proportional der Netz-

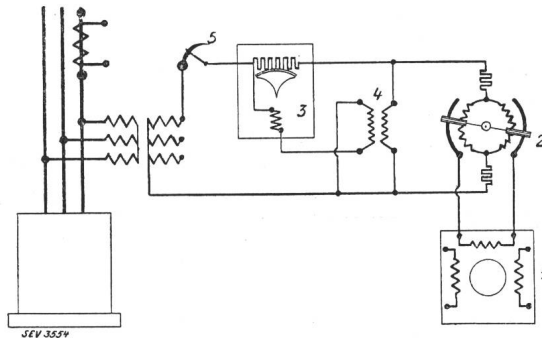


Fig. 14.
Schaltung des Leistungsreglers für spannungsunabhängige Leistungsregulierung.

- | | |
|--------------------|---------------------------------|
| 1 Leistungsregler. | 4 Hilfstransformator. |
| 2 Potentiometer. | 5 Leistungs-Abschaltwiderstand. |
| 3 Ausgleichregler. | |

spannung ändert, solange keine Sättigungserscheinungen die Proportionalität aufheben.

Beim Reguliersystem mit Zusatzreglern verändert sich die Leistung aus dem gleichen Grunde quadratisch mit der Spannung, da diese auch eine entsprechende Aenderung der Erregung der Hintermaschine nach sich zieht, was seinerseits einen veränderten Wirkstrom zur Folge hat.

Die Veränderung der Erregung kommt hier indirekt dadurch zustande, weil sich bei Spannungsänderungen der Strom in der Steuerwicklung (8) entsprechend ändert.

Will man die Leistung spannungsunabhängig haben, so muss dafür gesorgt werden, dass der Steuerstrom der Wicklung 8 von der Spannung beeinflusst wird und zwar derart, dass mit steigender Spannung dieser Strom prozentual gleichviel zurückgeht, wie die Spannung gestiegen ist. Fig. 14 zeigt eine Anordnung, die dieser Forderung über einen gewissen reichlichen Betrag gerecht wird. Dem Potentiometer ist der Regulierwiderstand eines automatischen Einstellreglers vorgeschaltet.

Der Regler ist so angeschlossen, dass er den Summenwert, gebildet aus Netz-Phasenspannung + die Sekundärspannung eines parallel zum Potentiometer geschalteten Hilfstransformators, konstant hält. Der Hilfstransformator ist als Umkehrtransformator angeschlossen. Sinkt die Netzspannung, so bewirkt der Regler eine Erhöhung der Spannung am Potentiometer, bei steigender Spannung umgekehrt.

IV. Der Einfluss der Frequenzwerte auf die Leistung.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Umformerleistung durch die drei Größen Spannung, Frequenzdifferenz (d. h. Schlupffrequenz der Rotorspannung der Asynchronmaschine) und Erregerstrom der Hintermaschine bestimmt ist. Bei konstantem Schlupf haben die praktisch auftretenden Aenderungen des Absolutwertes der Frequenzen keinen Einfluss auf die Leistung, besonders nicht bei Verwendung der beschriebenen automatischen Leistungsregulierung, weil der nach dieser Art geschaltete Leistungsregler in weiten Grenzen vollkommen frequenzunabhängig ist. Dagegen ist diese Nennfrequenzänderung selbstverständlich begrenzt, namentlich mit Rücksicht auf den variierenden Magnetisierungsstrom der Asynchronmaschine.

V. Die Forderungen an die Reguliereinrichtung im Einzel- und Parallelbetrieb mit andern Kraftwerken.

Aus diesen beiden Betriebsarten ergeben sich für die automatische Regulierung die folgenden Funktionen:

a) Einzelbetrieb.

Einzelbetrieb kommt nur in bezug auf dasjenige Netz in Frage, an welchem die Synchronmaschine angeschlossen ist, da der Betrieb der Asynchronmaschine nicht ohne ein speisendes Netz möglich ist. Beim Bahnumformer (z. B. $3 \sim 50/1 \sim 16\frac{2}{3}$) ist der Anschluss der Synchronmaschine auf das einphasige Bahnnetz ohne weiteres gegeben.

Bei $3 \sim /3 \sim$ Umformern (z. B. $3 \sim 50/3 \sim 42$) wird man die Synchronmaschine demjenigen Netze zuteilen, für das die alleinige Energiespeisung über den Umformer in Frage kommt. Beim Bahnumformer befindet sich darum die Synchronmaschine gewöhnlich auch am Bahnnetz, wie beim $3 \sim /3 \sim$ Umformer, weil der Umformer als Reserve- oder Spitzenleistungs-Lieferant für die Bahn in Betracht fällt.

Im Einzelbetrieb kommt nur Energielieferung nach Bedarf in Betracht; dem Umformer fällt dann in erster Linie die Aufgabe zu, diesen Bedarf unter möglichst genauer Einhaltung der Nennfrequenz des Bahnnetzes zu decken. Die Frequenzänderung in Funktion der Last eines üblichen Turbinenaggregates verläuft nach Fig. 15, welche die sogenannte Statik darstellt. Im Einzelbetrieb kann diese bekanntlich sehr klein gehalten werden, d. h. das

Aggregat kann seine Leistung vom Wert 0 bis Voll-
last bei konstanter Drehzahl abgeben, wenn der
Turbinenregulator hierfür vorgesehen ist. (Im Pa-
rallelbetrieb ist die astatische, d. h. Statik = 0,
Drehzahlregulierung bedeutend schwieriger). Für
den Frequenzumformer ist der Verlauf der Last in
Funktion der Frequenz in Fig. 16 dargestellt. Im

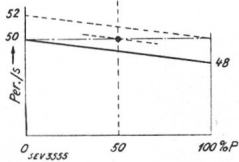


Fig. 15.
Leistungsdiagramm eines
Turbinenreglers.

Einzelbetrieb kommen selbstverständlich nur die
über der Abszisse liegenden Statikgeraden in Be-
tracht, da eine Energieübertragung im umgekehrten
Sinne nicht möglich ist. Wenn nicht Wert auf
möglichst konstante Frequenz der Synchronma-
schine gelegt wird, so kann der Einzelbetrieb voll-
kommen ohne automatische Regulierung erfolgen.
Die Erregung der Hintermaschine wird konstant
eingestellt, entsprechend einer gewünschten Fre-
quenz, z. B. derart, dass bei $f=50$ die Frequenz
der Synchronmaschine im Leerlauf $16\frac{2}{3}$ Per./s be-
trägt. Diese ändert dann entsprechend der natür-
lichen Charakteristik des Umformers, wozu sich
aber noch die Frequenzänderungen des Industrie-
netzes addieren.

Die automatische Regulierung im Einzelbetrieb
muss selbstverständlich auch die Einstellung jeder
beliebigen, im zulässigen Bereich befindlichen Leer-
lauffrequenz und der Statik gestatten, wie bei je-
dem Turbinenregler.

b) Parallelbetrieb.

Für die Aufnahme des Parallelbetriebes muss die
Regulierung zunächst die genaue Einstellung jeder
beliebigen Leerlauffrequenz gestatten. Da sich die

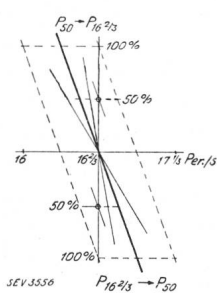


Fig. 16.
Statikkurven für
Frequenzumformer.

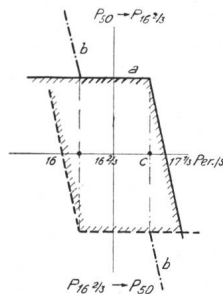


Fig. 17.
Statikkurven mit
Leistungs-
begrenzung.

Lastverteilung von parallel arbeitenden Aggregaten
durch die entsprechenden Werte der Statik ergibt,
muss dieser Wert von 0 bis zu einem gewissen Maxi-
mum ebenfalls einstellbar sein (Fig. 16). Die Ein-
stellung einer bestimmten Last erfolgt wie beim
Turbinenregler mit der Drehzahl- bzw. Frequenz-
verstellvorrichtung. Für eine gegebene, konstant
angenommene Netzfrequenz lässt sich die für Er-

reichung einer bestimmten Last nötige Drehzahl-
regulierung im voraus an Hand der Statik-
kurven in Fig. 15 und 16 für Turbinen bzw. für
Frequenzumformer bestimmen. Im Leerlauf muss
die Frequenz genau gleich der Netzfrequenz einge-
stellt werden. Zur Aufnahme der gewünschten Last
muss nur die Leerlaufdrehzahl derart erhöht wer-
den, dass die von der Leerlaufdrehzahl ausgehende
Statikgerade die durch den gleichen Punkt gehende
Horizontale auf dem gewünschten, in der Abszisse
angegebenen Leistungswert schneidet. In Fig. 15
und 16 sind diese Schnittpunkte für 50 % Last
angedeutet. Für den Frequenzumformer ergeben sich
hierfür zwei Schnittpunkte bzw. auch zwei Leerlauf-
frequenzen, entsprechend der Einstellung auf die
beiden Leistungsrichtungen.

Die automatische Frequenzregulierung muss die
Uebertragung beliebiger konstanter Werte gestatten,
solange sich die Frequenz der Synchronmaschine in
gewissen zulässigen Grenzen hält. Die absolut un-
eingeschränkte Uebertragung konstanter Leistungen
ist mit Rücksicht auf das in der Einleitung Gesagte
in vielen Fällen nicht zulässig. Die Regulierung
muss daher, ähnlich wie bei modernen Turbinen-
reglern mit Oeffnungsbegrenzung, die Einstellung
der konstanten Leistung mit der automatischen
Drehzahl-, bzw. Frequenzregulierung gestatten. Die
eingeschaltete Frequenzreguliereinrichtung dient in
diesem Falle als Frequenz- bzw. Drehzahlüberwa-
chung, und zwar derart, dass, z. B. bei Energieliefe-
rung an die Bahn, die Leistung nur solange konstant
gehalten wird, als die Frequenz gewisse, einstell-
bare Werte nicht überschreitet, da es keinen Sinn
hat, bei stark entlastetem Bahnnetz und daher hö-
herer Frequenz diese durch Belieferung mit kon-
stanter Leistung noch höher zu treiben. Andererseits
sichert die eingeschaltete Frequenzregulierung die
Gruppe bei eintretenden plötzlichen Abschaltungen
vor unerwünschter Drehzahlerhöhung, ähnlich wie
beim Turbinenregler, wieder mit dem Unterschied,
dass der Regler nicht nur gegen Drehzahlerhöhung,
sondern auch gegen Drehzahlensenkung schützen
muss. Das erste tritt ein bei Abschaltung von
Leistung in Richtung Asynchronmaschine \rightarrow Syn-
chronmaschine, das zweite bei umgekehrter Lei-
stungsrichtung.

Die durch Einstellung der konstanten Leistung
mittels Begrenzung im Zusammenhange mit der
Frequenzüberwachung sich ergebende Leistungs-
gerade ist in Fig. 17, Kurve a, dargestellt. Selbst-
verständlich ergibt sich auch diese Bedingung dop-
pelt, d. h. für beide Leistungsrichtungen.

Durch eine einfache konstruktive Massnahme
am Pendelregler kann auch die in Fig. 17 darge-
stellte Kurve b erhalten werden, wodurch erreicht
ist, dass die Oeffnungsbegrenzung nur über eine
gewisse beliebig einstellbare Frequenzvariation
wirksam ist. Die Gruppe arbeitet dann folgender-
massen: Z. B. wird bei Energierrichtung $50 \rightarrow 16$
die Leistung konstant gehalten, solange sich die
Frequenz der Synchronmaschine in der Grenze zwi-
schen $16\frac{1}{3} \rightarrow 17,0$ Per./s hält. Sinkt die Frequenz

unter den erstgenannten Wert, so steigt die an das 16-Per./s-Netz abgegebene Leistung weiter an; wenn sie dagegen den oberen Wert überschreitet, so geht die Leistung zurück, um je nach eingestellter Statik z. B. bei 17,2 Per./s umzukehren und dann vom 16-Per./s-Netz Leistung zu beziehen.

VI. Aufbau und Wirkungsweise der Reguliereinrichtung.

Die Reguliereinrichtung, die die beschriebenen Funktionen ergibt, ist in Fig. 18 und 18a dargestellt. In dieser ist *f* der Leistungseinstellregler, dessen Kontaktorgan in Abhängigkeit der Netzfrequenz durch den Hilfsmotor *h* und das Pendel *g* verstellt wird. Das Pendel *g* ist über den Winkelhebel *n* und den zweiarmigen Hebel *t* mit dem Kontaktorgan des Einstellreglers *f* gekuppelt. Zur beliebigen Einstellung der Statik des Reglers wird der Stützpunkt *u* des zweiarmigen Hebels *t* mit der Gewindespindel *v* verstellt. Der zweiarmige Hebel *t* ist so abgestützt gelagert, dass er bei Leerlauf parallel zur Gewindespindel *v* liegt. Bei dieser Lage des Hebels *t* entspricht die Lage des Kontaktorgans des Einstellreglers dem Leistungswert Null. Zur Aufrechterhaltung des Leistungswertes Null am Einstellregler für verschiedene Frequenzen durch Aenderung der gegenseitigen

gegenüber der Mutter in Drehung versetzt und mit der Welle durch eine lösbare Kupplung verbunden ist. Diese Einrichtung zur Einstellung der Leistung in Abhängigkeit der Netzfrequenz dient auch dazu, im Leerlauf die Drehzahl einzustellen. An einem Zeiger *z* erkennt man jederzeit die Leerlaufdrehzahl.

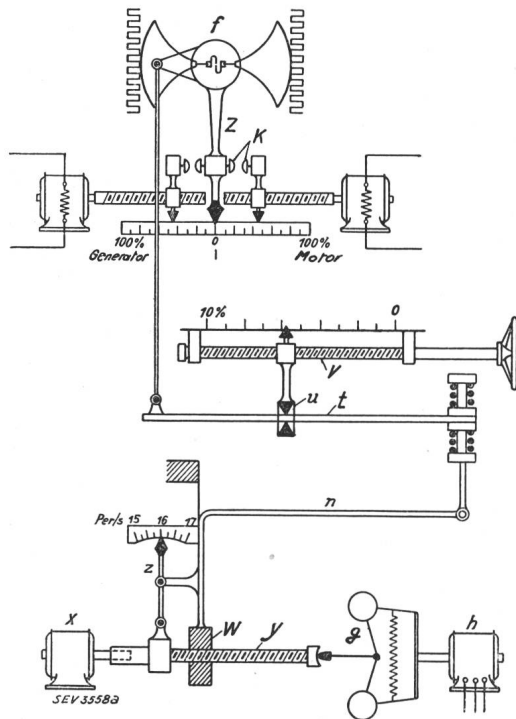


Fig. 18. Schematische Darstellung des Frequenzreglers.

Lage der Stellung der Schwunggewichte des Drehzahlpendels gegenüber dem Kontaktorgan des Reglers ist der eine Arm des Winkelhebels *n* mit einer Wandermutter *w* ausgerüstet, die auf der Welle des Drehzahlpendels verschiebbar ist. Diese Verschiebung der Wandermutter auf der Pendelwelle *y* erfolgt durch einen Hilfsmotor *x*, der die Welle

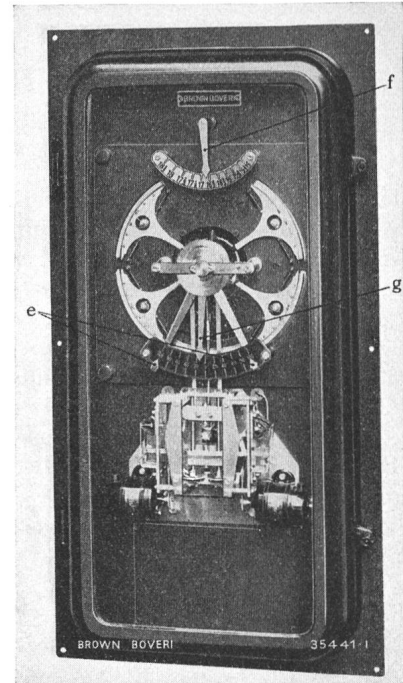


Fig. 18a. Frequenzregler mit Leistungsbegrenzungseinrichtung. Vorderansicht.

Die Drehzahlregulierung im Leerlauf kommt nun auf folgende Art zustande:

Im ausregulierten Zustand befindet sich der zweiarmige Hebel *t* in horizontaler und die mit diesem Hebel gekuppelten Sektoren des Einstellreglers in der Mittellage. In dieser Stellung weist die von den Sektoren abgegriffene Spannung den Wert Null auf. Der Leistungsregler, welcher den Servomotor beeinflusst, verharrt in einer bestimmten Stellung, weil in der Ferraris-Trommel kein Drehmoment entwickelt wird, indem nur die Spannungswicklung allein erregt ist. Sinkt z. B. aus irgendeinem Grunde die Drehzahl der Umformergruppe, so nehmen auch der Pendelhebel *t* und demzufolge auch die Sektoren eine andere Lage ein. Für den angenommenen Fall dreht sich der Zeiger der Sektoren im Uhrzeigersinn. Damit wird der Steuerwicklung des Leistungsreglers ein bestimmter Strom zugeführt, und zwar derart, dass die Drehtrommelbewegung den Servomotor im Sinne einer Drehzahlerhöhung verstellt. Demzufolge wird sich aber auch der Pendelhebel rückläufig bewegen. Wenn er die horizontale Lage wieder erreicht hat, sind auch die Sektoren wieder in ihre Mittellage gelangt, und weil dabei das vom Leistungsregler entwickelte Drehmoment auch Null geworden ist, ist in diesem Moment der Regulier-

vorgang beendet. Eine am Leistungsregler angebrachte Dämpfung mit Rückführung sorgt dafür, dass die rückläufige Bewegung des Servomotors derart frühzeitig erfolgt, dass eine pendelnde Ueberregulierung vermieden wird. Will man die Drehzahl willkürlich verstellen, so erfolgen die Vorgänge in anderer Reihenfolge, d. h. durch Betätigung des Verstellmotors für die Wandermutter verstellen sich zuerst die Sektoren. Die dadurch dem Leistungsregler aufgedrückte Steuerspannung bewirkt die Verstellung des Servomotors und damit die Drehzahländerung, und zuletzt erfolgt wiederum die Rückführung der Sektoren in die Mittellage durch die erzwungene Drehzahländerung. Auch in diesem Zustande befinden sich nach vollständiger Auswirkung des Reguliervorganges die Sektoren in der Mittellage. Die am Pendelhebel eingestellte Statik kommt daher bei der Drehzahlregulierung im Leerlauf nur während dem Reguliervorgang zur Wirkung. Die am Leistungsregler angebrachte mechanische Rückführ- und Dämpfungseinrichtung wird auch bei Leerlauf-Drehzahlregulierungsvorgängen unterstützt durch eine rein elektrisch wirkende Rückführwirkung.

Die Einstellung einer konstanten Leistung mit eingeschaltetem Pendelregler entsprechend Diagramm *a* in Fig. 17 geschieht auf folgende Art:

Da durch die Stellung des Einstellreglers *f* die regulierte Leistung eindeutig bestimmt ist, wird der Zeiger *o* der Oeffnungsbegrenzung auf denjenigen Skalenwert eingestellt, der der gewünschten Leistung entspricht. Es ist lediglich zu überlegen, in welcher Energierichtung die Leistung erwünscht ist. Die Begrenzungseinrichtungen enthalten zwei Zeiger, einen für motorisches und einen für generatorisches Arbeiten der Asynchronmaschine. Zur Aufnahme der Last wird nun einfach die Leerlaufdrehzahl durch Betätigung des Motors verstellt, und zwar, wenn Leistung an die Bahn abgegeben werden, d. h. motorisches Arbeiten der Asynchronmaschine erfolgen soll, im Sinne von Frequenzerhöhung. Da die Frequenz aber praktisch nicht ändert, indem sie durch das Netz gehalten ist, verschieben sich die Sektoren des Einstellreglers. Die Verstellung der Leerlaufdrehzahl erfolgt solange, bis der Pendelhebel *t* an den Begrenzungskontakten *k* zum Anliegen kommt. Zur leichtern Bedienung leuchtet in diesem Moment eine Lampe auf, die anzeigt, dass der Regler an der Begrenzung angelangt ist. Um sicher zu sein, dass die gewünschte Leistung unverändert bleibt, wird die Leerlaufdrehzahl-Verstellung noch etwas weiter betätigt, und zwar zweckmässig bis auf den Wert, welcher ausserhalb der praktisch vorkommenden maximalen Frequenz liegt. Um bei Abschaltungen der Reguliereinrichtung die Aktionsfreiheit zu sichern, muss die Begrenzung für die andere Energierichtung etwas aus der Nulllage verstellt sein, damit der Regler gegensinnige Regulierimpulse erwirken kann. Dieser Regulierapparat ist gewöhnlich im Kommandoraum aufgestellt und hat darum die vorteilhafte Eigenschaft, dass auch dort die Einstellung und

Wirkungsweise der Reguliereinrichtung jederzeit kontrolliert werden kann.

VII. Die Reguliergeschwindigkeit.

Bei jeder Drehzahländerung treten in der Drehstromleitung zu der Hauptmaschine Wirkstromschwankungen auf. Wenn z. B. durch Verstellung der Wandermutter eine höhere Drehzahl erzwungen werden soll, so hat die Veränderung der Erregung der Hintermaschine eine Wirkstromentnahme aus dem Netz zur Folge, welche zur Beschleunigung der Gruppe dient. Dieser Strom überträgt sich auch auf den Leistungsregler, und weil dieser demjenigen der Steuerwicklung entgegenwirkt, wird die Drehbewegung des Leistungsreglers auch unter dem Einfluss dieses Stromes frühzeitig abgebremst bzw. rückgängig gemacht. Die in Fig. 19 dargestellten Diagramme zeigen den Drehzahlverlauf bei Vollastabschaltungen. Man ersieht daraus, dass die Drehzahlerhöhung bzw.

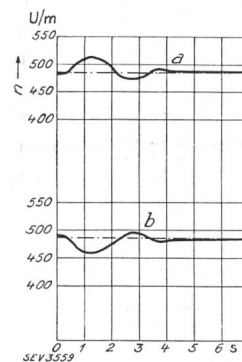


Fig. 19.
Drehzahlabschaltediagramme.
a Drehzahlverlauf bei Leistungsabschaltung der Synchronmaschine; Asynchronmaschine als Motor arbeitend.
b Drehzahlverlauf bei Leistungsabschaltung der Synchronmaschine; Asynchronmaschine als Generator arbeitend.

-senkung nur einige Prozent erreicht und während wenigen Sekunden ausreguliert ist. Die beim Versagen der automatischen Regulierung auftretenden maximalen Drehzahlerhöhungen sind durch die Sättigung und Leistung der Hintermaschine begrenzt; sie betragen ca. 10 bis 20 % und sind demnach bedeutend niedriger als die bei hydraulischen Turbinen auftretenden Durchbrenndrehzahlen.

Trotzdem das Schwungmoment und deshalb auch die Schwungleistung einer Umformergruppe im Verhältnis zum hydraulischen Turbinenaggregat bedeutend höhere Werte aufweisen, kann die bei der Leistungsabschaltung auftretende maximale Drehzahlbeschleunigung unter Umständen ebenso hohe Werte annehmen wie bei der hydraulischen Turbine. Die Ursache dieser Tatsache liegt in der viel höheren Ueberlastungsfähigkeit des Umformers, besonders in bezug auf maximales Drehmoment. Diese ergibt sich ohne weiteres, weil ja die Hintermaschine so stark dimensioniert sein muss, dass der Umformer seine Nennleistung nicht nur bei Synchronismus, d. h. bei Schlupffrequenz 0, sondern auch bei einem bestimmten Schlupfwert abgeben kann. Wenn daher die Hintermaschine bei synchronem Lauf der Asynchronmaschine voll ausgenutzt wird, so ergibt sich in diesem Zustand ein viel höheres Drehmoment.

In Tabelle I sind die diesbezüglichen approximativen Daten für Turbinengenerator und Frequenzumformer einander gegenübergestellt. (Als

gegeben als bei irgendeinem Turbinenaggregat, weil einerseits, wie bereits gesagt, die Schwungleistung viel grösser ist und andererseits jede Drehzahlände-

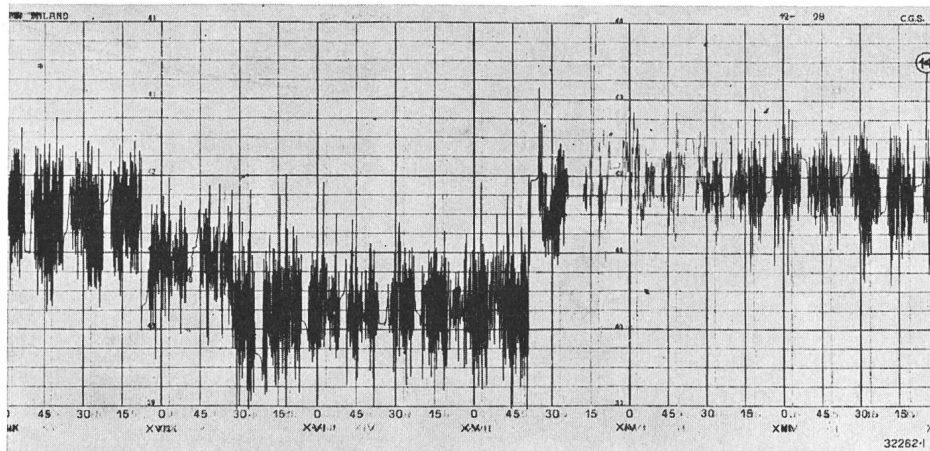


Fig. 20a.
Frequenz des Industrienetzes.

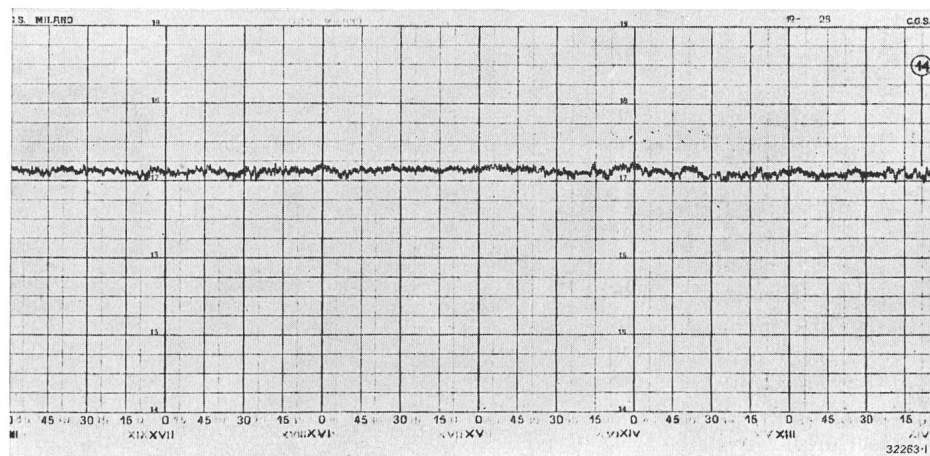


Fig. 20b.
Frequenz des Bahnnetzes.

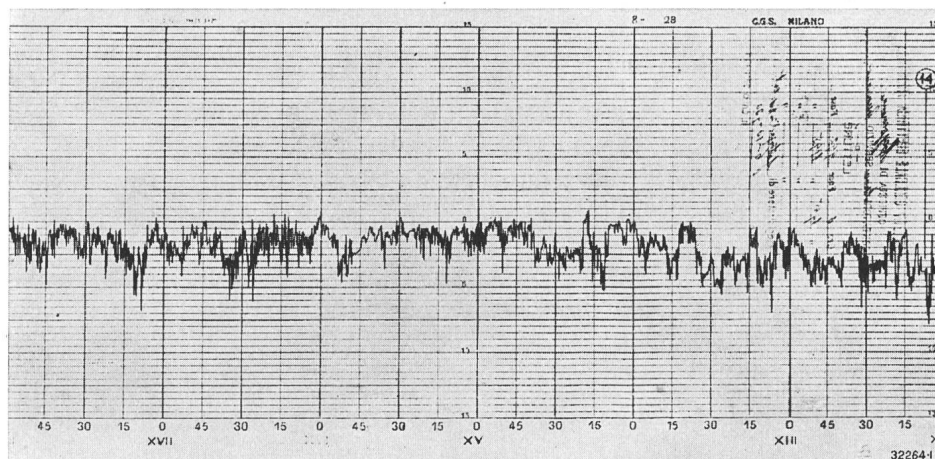


Fig. 20c.
Leistung des Bahnnetzes.

Generator wurde in beiden Fällen eine Einphasenmaschine gleicher Leistung und gleicher Drehzahl angenommen.)

Die Erreichung möglichst günstiger Abschalt-drehzahldiagramme oder, was aufs gleiche herauskommt, die genaue Einhaltung der Nennfrequenz bei Frequenzregulierung bzw. Pufferbetrieb ist beim elastischen Frequenzumformer viel leichter

erreichbar als bei direktem Energieaustausch mit dem die Asynchronmaschine speisenden Netze erfolgt.

Es wurde bereits erörtert, wie eine Drehzahl-erhöhung der Gruppe durch Energieentnahme aus diesem Netz der Asynchronmaschine zustande-kommt. Bei leerlaufender Gruppe, d. h. bei abge-schalteter Synchronmaschine, entsteht eine ver-langte Drehzahlablenkung dadurch, dass über die

Hintermaschine dem Rotor der Asynchronmaschine eine negative Schlupfspannung, entsprechend ihrem Generatorbetrieb, zugeführt wird. Weil nun im angenommenen Falle die Synchronmaschine abgekuppelt ist und ihr Netz darum die von der Asynchronmaschine abzugebende Generatorleistung nicht liefern kann, wird dieselbe von der in der Gruppe in diesem Moment aufgespeicherten kinetischen Energie entnommen und damit die Gruppe unter Energierücklieferung ans Netz der Asynchronmaschine abgebremst.

Tabelle I.

	Hydr. Turbine mit Generator	Frequenz- umformer
Leistung an der Kupplung kW	7500	7500
Schwungmoment GD^2 . . ca. m ² t	90	170
Schwungenergie $A = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} GD^2 \left(\frac{n}{60}\right)^2$ ca. m t	800	1400
Max. Drehzahlbeschleunigung $\frac{dn}{dt}$. . %/s	14	16
Min. Anlaufzeitkonstante $t = \omega \cdot \frac{J}{M}$. . s	8	7

Der Raschheit, mit der man die Drehzahländerungen erzwingen oder bei Pufferbetrieb zufolge Laständerungen eingetretene Abweichungen ausgleichen will, ist hauptsächlich durch die damit selbstverständlich verbundenen Leistungsstöße im Netz der Asynchronmaschine eine Grenze gesetzt, ähnlich wie sich bei hydraulischen Turbinen die Reguliervorgänge auf die Druckleitungen auswirken. Bei diesen können aber gewöhnlich nur Drehzahlerhöhungen durch Energiezufuhr erzwungen werden, während bei Drehzahlabenkung der Drehzahlregler die Energiezufuhr nur verhindern kann, demzufolge sich dann der Drehzahlabfall *allein* aus den bremsend wirkenden Reibungs- und Ventilationsverlusten des Aggregates ergibt.

Die Diagramme Fig. 20 a bis c, aufgenommen an einem 7000 kW-3 ~ 42/3 ~ 16²/₃-Umformer, zeigen, wie die Frequenz der Synchronmaschine trotz starken (künstlich vorgenommenen) Schwankungen des Industrienetzes eingehalten wird.

Trotzdem die Reguliervorgänge der Wirk- und Blindleistung durch Veränderung der elektromagnetischen Verhältnisse der Kommutatorkaskade erzwungen werden, ergeben sich hier bedeutend grössere Reguliergeschwindigkeiten als z. B. bei der Spannungsregulierung von Synchronmaschinen. Die magnetischen Zeitkonstanten der letzteren weisen bekanntlich Werte in der Grössenordnung von 5 bis 15 s auf, je nach Leistung, Drehzahl und Stärke des Erregers, während sie bei Asynchronmaschinen mit Hintermaschine praktisch 0 sind, vor allem darum, weil es sich hier um Wechselstromerregung handelt. Diese bedingt durchwegs Magnetkörper mit lamelliertem Eisen. Zudem wird die Erregerleistung aus dem eigenen Wechselstromnetz be-

zogen, woraus sich alle Vorteile einer fremderregten Maschine ergeben.

VIII. Die Blindlastregulierung der Hauptmaschinen.

Je nach den Verhältnissen des Aufstellungsortes können die Hauptmaschinen mit automatischen Blindlast-, Leistungsfaktor- oder Spannungsreglern ausgerüstet werden. Die Asynchronmaschine weist gegenüber der Synchronmaschine den Vorteil des doppelten Regulierbereiches auf, d. h. der sich aus der Erregerleistung der Hintermaschine ergebende Blindlastbetrag an der Asynchronmaschine kann ohne weiteres nach beiden Richtungen als Blindlastabgabe und Blindlastbezug erhalten werden.

Bei der Synchronmaschine ist dies bekanntlich nicht der Fall; die Blindlastaufnahme ist auch mit besonderen Massnahmen bezüglich Bemessung der Haupt- und Erregermaschine beschränkt, da zwecks Steigerung des Blindlastbezuges das Polrad mit negativer Erregung gespeist werden muss, was aber mit Rücksicht auf die Sicherheit des synchronen Laufes nur bis zu einem Bruchteil der Nennererleistung möglich ist. Auf die speziellen Fragen betreffend der prinzipiellen Eignung als Blindlastmaschine dieser beiden Maschinentypen wird hier nicht weiter eingetreten, da hierüber reichlich Literatur vorhanden ist ⁴⁾.

Die automatische Blindlastregulierung hat gegenüber der automatischen Leistungsfaktor- und Spannungsregulierung den Vorteil der eindeutigen Bestimmung der Totalstrombelastung der Maschine. Bei der reinen Spannungsregulierung dagegen richtet sich der Blindstrom nach den Netzverhältnissen; die Ueberlastgefahr im Maschinenstrom ist daher bei dieser Regulierart, besonders wenn die Maschine gleichzeitig mit hoher Wirklast arbeitet, grösser, so dass sie nur im Zusammenhange mit einer Schutzeinrichtung zulässig ist. Die $\cos \varphi$ -Regulierung gestattet die Arbeitsweise der Maschinen mit bestem Wirkungsgrade, wird daher meistens in den Fällen angewandt, wo der Umformer dauernd mit konstanter Last arbeitet. Bei schwankender Last, also z. B. im Pufferbetrieb, bedingt die $\cos \varphi$ -Regulierung Netzspannungsschwankungen, da bei konstantem $\cos \varphi$ die Blindlast mit der Wirklast ändert.

IX. Das Verhalten der Umformer bei Netzstörungen.

a) Störungen im Netz der Synchronmaschine.

Bei Unterbruch in der Zuleitung zur Synchronmaschine ergeben sich ähnliche Vorgänge wie bei einem Turbinenaggregat. Je nach der Leistung, die im Moment der Störung vorhanden ist, tritt eine Drehzahlbeschleunigung bzw. -verzögerung ein, welche vom Frequenzregler ausreguliert werden muss. Die nach der Abschaltung sich einstellende Drehzahl ist bestimmt durch die Einstellung des

⁴⁾ Siehe z. B. E. Santuari, Alcuni considerazioni sui sincroni et sugli asincroni, Elettrotecnica 1931.

Leerlauf-Frequenzwertes. Die Wiederinbetriebsetzung bzw. Parallelschaltung der Synchronmaschine erfolgt genau gleich wie bei Turbinenaggregaten.

Bei *Kurzschlüssen* im Netz verhält sich der Umformer ebenfalls gleich wie irgendeine Turbinen-Generatorgruppe, d. h. der Frequenzregler sucht auch während des Kurzschlusses die Drehzahl zu halten.

Die Rückwirkung des im ersten Zeitmoment des Kurzschlusses an der Synchronmaschine auftretenden Leistungsstosses auf die Asynchronmaschine ist minim, weil dieser vorwiegend durch die kinetische Energie des gesamten Umformerrotors gedeckt wird. Andererseits sorgt die äusserst schnell wirkende Wirklastregulierung dafür, dass die Gruppe auch bei mehrere Sekunden dauernden Kurzschlüssen in Betrieb bleibt, insofern die Synchronmaschine nicht abgeschaltet wird, verursacht durch Vorgänge, auf welche die Regulierung ohne Einfluss ist, wie z. B. Aussertrittfallen, zu grosse Blindleistung usw.

Frequenzänderungen haben auf das Verhalten des Umformers ebenfalls keinen Einfluss, solange die dadurch entstehende Erhöhung der Schlupffrequenz die garantierten Werte nicht überschreitet. Um der damit verbundenen Ueberlastgefahr der Kaskade zu begegnen, ist an den Zuleitungen zum Rotor der Asynchronmaschine ein automatisch wirkendes Schlupfbegrenzungsrelais angeschlossen, welches bei dauernder Ueberschreitung der maximal zulässigen Werte die Asynchronmaschine inklusive Kaskade oder, je nach Verhältnissen, auch die Synchronmaschine abschaltet.

b) Störungen im Netz der Asynchronmaschine.

Der *Unterbruch in der Hauptzuleitung* hat ausser dem Verschwinden der *Wirk-Blindlast* keine weiteren Folgen, da die Drehzahl durch die Synchronmaschine gegeben ist. Ist diese mit anderen Werken parallelgeschaltet, so bleibt die Drehzahl unverändert. Arbeitet die Gruppe auf der Synchronseite allein, so hat das Abschalten der Asynchronmaschine selbstverständlich den Stillstand der Gruppe zur Folge. Es ist nötig, dass bei allen Unterbrechungen in der Hauptleitung der Hauptschalter der Asynchronmaschine fällt, um das einwandfreie Wiedereinschalten dieser Maschine willkürlich am Aufstellungsort der Gruppe vornehmen zu können.

Die automatische Auslösung des Hauptschalters erscheint zunächst auf die einfachste Art durch ein Nullspannungsrelais gegeben, welches an das Netz der Asynchronmaschine angeschlossen ist.

Da nun aber eine Asynchronmaschine mit angeglichener Kommutatorkaskade imstande ist, nicht nur unter-, sondern ebensogut übererregt zu arbeiten, so kann sie auch eine Spannung an den Statorklemmen erzeugen, wenn nur der Netzschalter ausgeschaltet wird und der Stromkreis der Kommutatorkaskade geschlossen bleibt. Aus diesem Grunde wurde die Schaltung so gewählt, dass beim Aus-

lösen des Hauptschalters immer auch der Erregerkreis zur Hintermaschine unterbrochen wird.

Diese Verriegelung allein genügt nun aber nicht, weil die Stromzufuhr nicht nur durch den am Aufstellungsort befindlichen Hauptschalter, sondern auch durch einen weiter entfernt liegenden Schalter erfolgen kann. Die in solchen Fällen am Stator der Asynchronmaschine entstehende Spannung, hervorgerufen durch eine Art Selbsterregung, bildet sich momentan aus und übersteigt in allen Fällen die Betriebsspannung wesentlich.

Der folgerichtige Schutz für diese Gefahr war daher der Einbau eines momentan wirkenden Ueberspannungsrelais, welches von der Netzspannung der Asynchronmaschine beeinflusst wird.

Die Wiederinbetriebnahme der Asynchronmaschine erfolgt gewöhnlich nach der üblichen Anlassmethode der Gruppe durch vorherige Abtrennung der Synchronmaschine. Es besteht aber die Möglichkeit, diesen Unterbruch zu vermeiden, was weiter unten im Kapitel «Anlassmethoden» gezeigt wird.

Bei *Kurzschlüssen* im Netz gibt die Asynchronmaschine eine ihrer magnetischen Energie entsprechende Kurzschlussarbeit ab. Der Kurzschlussstrom klingt sofort ab, weil die Erregung zufolge der zusammengesunkenen Netzspannung ebenfalls momentan verschwindet. Der Umformer wird gegen derartige Störungen am zweckmässigsten durch moderne Distanzrelais geschützt.

Frequenzänderungen ergeben das gleiche Verhalten, wie in den Abschnitten IV und IX a erwähnt.

Um die Gruppe auch gegen eventuelle Versager in der automatischen Reguliereinrichtung sicher zu schützen, ist auf der Hauptwelle direkt ein Zentrifugalschalter angebracht, welcher bei einer gewissen Ueberdrehzahl anspricht und die Gruppe momentan von beiden Netzen abtrennt.

Bei stark gestörten Netzen oder in ähnlichen Fällen, wo es erwünscht ist, die Leistung der Gruppe ohne komplizierte Manipulationen zu reduzieren, kann durch einfache Betätigung des leichten Regulierwiderstandes Pos. 5 in Fig. 14 die Leistung trotz eingeschalteter automatischer Regulierung bis auf den Wert 0 bequem beherrscht werden.

X. Die Anlassmethoden.

In der Praxis werden hauptsächlich die folgenden Methoden angewandt:

1. Direkter Anlauf der Haupt-Asynchronmaschine durch Widerstandsabschaltung im Rotorkreis;
2. Anlauf durch Turbine, wenn die Gruppe mit einer solchen gekuppelt ist;
3. Anlauf mit separatem Drehstrom-Anwurfmotor;
4. Anlauf mit separater Gleichstrom-Umformergruppe.

Die unter 1. angegebene Methode ist die gebräuchlichste, weil hierfür nur die Aufstellung eines Rotoranlassers benötigt wird. Als solchen verwendet man gewöhnlich Wasserwiderstände. Der Anlauf mit separatem Drehstrom-Anwurfmotor wird, weil viel teurer, selten angewandt. Er kommt namentlich dort in Frage, wo die Synchronmaschine während längeren Zeiten als reiner Phasenschieber arbeiten muss und die Haupt-Asynchronmaschine abgekuppelt bleibt. Um zwecks Parallelschalten die Drehzahlregulierung zu ermöglichen, muss der Anwurfmotor mit kleinerer Polzahl als die Synchronmaschine ausgeführt sein. Die Einstellung der Drehzahl erfolgt durch Regulierung des Rotorwiderstandes.

Noch seltener ist das unter 4. angegebene Gleichstrom-Anlassverfahren. Dieses kommt höchstens dort in Frage, wo eine passende Gleichstrommaschine zufällig vorhanden ist. Das Anlassen erfolgt in Leonard-Schaltung durch Speisung der Scherbiusmaschine mit Gleichstrom.

Dieses Anlassen kann selbstverständlich vollkommen stossfrei erfolgen und gestattet zugleich eine bequeme Einstellung der Drehzahl.

Die unter 2, 3 und 4 angegebenen Methoden weisen gegenüber der ersten einen gemeinsamen Vorteil auf. Er besteht in der freien Wahl der Spannung des Rotors der Asynchronmaschine bzw. der Scherbiusmaschine. Beim direkten Anlassen nach 1 ist dies nicht der Fall, weil dort die Rotorspannung mit Rücksicht auf die im Stillstand entstehende Spannung an den Schleifringen tiefer gehalten werden muss.

In den oben beschriebenen Anlassmethoden wurde gezeigt, auf welche verschiedene Arten die Umformergruppe auf Drehzahl gebracht werden kann. Im nachstehenden seien noch kurz die nach

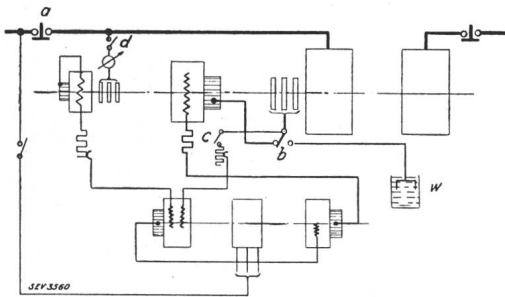


Fig. 21.

Schaltschema der Asynchronmaschine mit Kaskade.

Erreichung der approximativen Drehzahl nötigen Schaltmanöver, wodurch die Kaskade an die Asynchronmaschine angeschlossen wird, zusammengefasst. Nachdem der Rotoranlasser w in der Kurzschlußstellung angelangt ist und der Statorstrom auf den Leerlaufwert zurückgegangen ist, wird zunächst der Schalter c (Fig. 21) geschlossen, womit der Widerstandserregerkreis wirksam wird. Der Schalter d für den Hilfsfrequenzwandler kann hierauf geschlossen werden; um hierbei Stöße zu ver-

meiden, ist dieser derart verriegelt, dass er nur eingeschaltet werden kann, wenn sich die Induktionsregler in ihrer Mittellage befinden. Zuletzt wird der Umschalter b betätigt, wodurch die Schleifringe der Asynchronmaschine vom Rotoranlasser abgetrennt und mit den Hauptklemmen der Scherbiusmaschine verbunden werden. Auf diese Weise erfolgt der Anschluss der Kaskade vollkommen stossfrei, da sämtliche Erregerkreise praktisch noch vollkommen stromlos sind, weil die Asynchronmaschine leer und darum mit sehr kleinem Schlupfe läuft.

Anders verhält sich nun aber diese Zuschaltung, wenn die Drehzahl der Gruppe bereits durch die eingeschaltete Synchronmaschine gegeben ist, denn in diesem Falle entspricht die Schlupffrequenz der Asynchronmaschine nicht mehr dem sehr kleinen Leerlaufwert, sondern er ist gegeben durch die beiden Frequenzen. Die Zuschaltung der Kaskade kann unter solchen Umständen, wie angedeutet, erwünscht sein, z. B. bei Störungen, wenn die Asynchronmaschine herausgefallen ist oder wenn von Phasenschieberbetrieb auf Leistungsbetrieb übergegangen werden soll usw.

In diesem Falle wird folgendermassen vorgegangen: Alle Schalter der Asynchronmaschine inklusive Kaskade sind vorerst ausgeschaltet, wie wenn die Gruppe normal anzulassen wäre; der Umschalter verbindet den Rotor der Hauptmaschine mit dem Anlasswiderstand. Der Statorschalter a zur Hauptmaschine wird geschlossen. Der Anlasswiderstand w bleibt vollkommen vorgeschaltet, damit die Gruppe keine Leistung überträgt. Der Schalter für den Widerstandserregerkreis c wird geschlossen. Dadurch entsteht an den Klemmen der Scherbiusmaschine eine Spannung, deren Grösse von der Stärke des Kreises bzw. vom Grade der Autoregulierung abhängig ist.

Nun kann der Umschalter b auf die Scherbiusmaschine umgelegt werden; der sich dabei ergebende Leistungsstoss ist um so kleiner, je stärker die Wirkung der Autoregulierung eingestellt ist. Zuletzt wird der Schalter d zum Hilfsfrequenzwandler geschlossen, womit die Kaskade komplett angeschlossen ist und der Regulierbetrieb aufgenommen werden kann. Selbstverständlich kann dieses Umschalten vollkommen stossfrei erfolgen, wenn zuvor die Spannung der Scherbiusmaschine entsprechend der an den Schleifringen der Hauptmaschine existierenden Spannung mit den Induktionsreglern eingestellt wird.

XI. Ausgeführte Anlagen.

Die erste nach den dargestellten Prinzipien arbeitende Gruppe war diejenige der Soc. Generale Elettrica Tridentina, aufgestellt in deren Kraftwerk in Mezzocorona. Sie dient der Kupplung des 60-kV-16,7-Per./s-Netzes der Italienischen Staatsbahnen mit dem 130- und 60-kV-42-Per./s-Netze dieser Gesellschaft. In Fig. 22 ist der Einbau der Gruppe

in diese beiden Netze ersichtlich. Auf der 16-Per./s-Seite arbeiten in erster Linie die beiden Kraftwerke Vizzate mit $2 \cdot 9000$ kVA, Cardano mit $3 \cdot 9000$ kVA mit der Synchronmaschine des Umformers in Mezzocorona parallel. Der Anschluss dieses 16-Per./s-Netzes an dasjenige in Mittel-Italien mit dem Kraftwerk Bressanone ist vorgesehen. Diese Gruppe hat zwei Hauptaufgaben zu erfüllen:

1. dient sie als Reservegruppe für eine 16-Per./s-Generatorgruppe des Kraftwerkes Vizzate und
2. zur Umformung der im Kraftwerk Vizzate erzeugten überschüssigen Energie für das 42-Per./s-

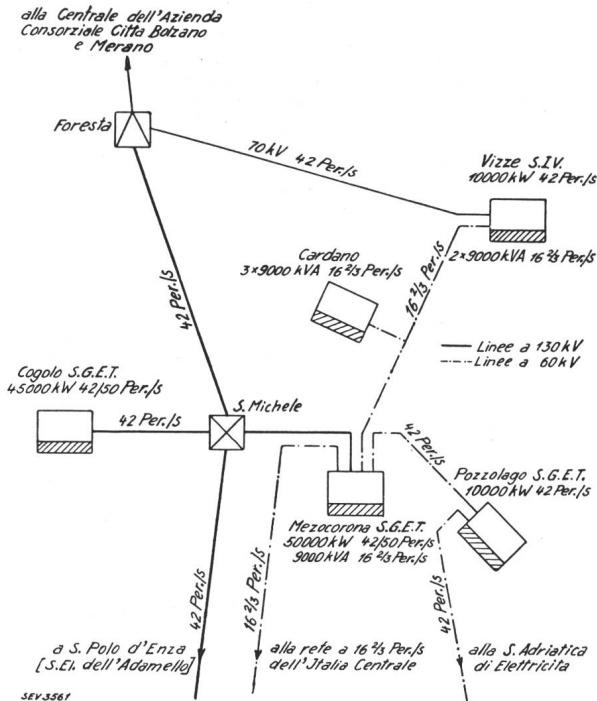


Fig. 22. Anlage Mezzocorona.

Industrienetz der S. G. E. T., wobei diese Energie von Vizzate nach Mezzocorona durch die 60-kV-16-Per./s-Leitung übertragen wird. Die Gruppe muss auch imstande sein, ein separates Bahnnetz, vornehmlich die Strecke Bolzano-Brennero, allein zu speisen. Es ergibt sich daraus, dass diese Gruppe beim Betrieb als Reserve möglichst gleiche Charakteristiken aufweisen muss, wie die Turbinenaggregate der übrigen Kraftwerke und auf der 16-Per./s-Seite eine Leistung abgegeben werden kann, die praktisch nur vom Wert der Bahnfrequenz abhängig ist. — Um zu vermeiden, dass beim Umformen der in Vizzate erzeugten überschüssigen Energie auch ein Teil der Bahnenergie umgeformt wird, die in Kraftwerken von andern Gesellschaften erzeugt wird, muss der Umformer imstande sein, diese Leistung auf jeden beliebigen einstellbaren Wert dauernd konstant zu halten.

Namentlich durch den Energietransport über die 60-kV-16-Per./s-Leitung der Italienischen Staatsbahnen ergaben sich für diesen Umformer in regulier-technischer Beziehung beachtenswerte Forderungen. Es sei z. B. hier nur erwähnt, dass bei den

Abnahmeversuchen die Bahnleistung allein durch das Kraftwerk Vizzate gedeckt wurde, während gleichzeitig die überschüssige Leistung dieses Werkes über die erwähnte Leitung nach Mezzocorona transportiert und dort für das Industrienetz als konstante Leistung umgeformt wurde. Im Moment, wo die in Mezzocorona konstant umgeformte Leistung Richtung $16 \rightarrow 42$ Per./s 7000 kW betrug und die Bahn 2200 kW absorbierte, wurde das Kraftwerk Vizzate momentan abgetrennt. Bei der Abschaltung kehrte die Energierichtung am Umformer augenblicklich

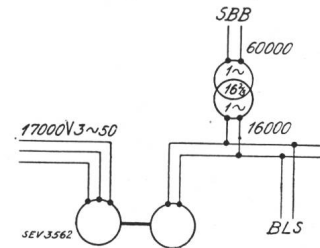


Fig. 23. Anlage Mühleberg.

Kupplung des Drehstromnetzes der Bernischen Kraftwerke (BKW) mit den Einphasennetzen der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der Berner Dekretsbahnen (BLS).

um und die von der Bahn benötigte Energie von 2200 kW war in weniger als 3 s vollkommen ausreguliert. Die Frequenz betrug vor der Abschaltung beim Parallelbetrieb mit Vizzate ca. $17,1$ Per./s und nach ihr im ausregulierten Zustand $16,9$ Per./s. Der Uebergang der Regulierung vom Betrieb mit konstanter Leistung auf reine Frequenzregulierung vollzog sich daher mit einer Frequenzschwankung von ca. $0,2$ Per./s. Die Regulierung des Umformers arbeitete mit ca. $\pm 1\%$ Statik.

Erwähnt seien auch die 3 Umformer von je 5000 kW der Soc. An. delle Acciaierie & Ferriere Lombarde im Kraftwerk Pontremoli, die ebenfalls vorwiegend für die Energielieferung an das 16-Per./s-Drehstromnetz der Staatsbahnen bestimmt sind. Besonders interessant ist an diesen Umformern, dass die Seite des Industrienetzes mit 42 Per./s oder



Fig. 24. Frequenzumformer Mühleberg.

50 Per./s Drehstrom betrieben werden kann. Die Asynchronmaschine, inklusive Kaskade, kann durch sinnngemäss ausgebildete Umschaltvorrichtungen ohne weiteres an das eine oder andere Industrienetz angeschlossen werden unter Innehaltung der gleichen Bedingungen bezüglich Leistung und Reguliercharakteristiken.

Von den Industrie-Umformern sei derjenige der Cie. Métallurgiques des Terres Rouges, Esch-s.-Alzette erwähnt, der eine Leistung von 4200 kW für die Kupplung zweier Drehstromnetze von 50 und

42 Per./s aufweist, und derjenige der Prager Eisenindustrie, Eisenwerke Kladno, von 4000 kW, welcher den Energieaustausch zwischen einem 50- und einem 25-Per./s-Netz gestattet.

In der Schweiz kamen bis heute zwei Bahnumformer zur Aufstellung zwecks Energielieferung an die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB); es sind dies die 6700-kW-Gruppe der SBB im Unterwerk Seebach und die 7200-kW-Gruppe der Bernischen Kraftwerke im Kraftwerk Mühleberg. Die zweite ist in reguliertechnischer Beziehung besonders interessant, weil die Energielieferung auf der 16-Per./s-Einphasenseite gleichzeitig an zwei voneinander

unabhängige Konsumenten (SBB und Berner Dekretsbahnen) erfolgt. Die SBB muss mit konstanter, beliebig einstellbarer Leistung gespeist werden, während sich gleichzeitig die Energielieferung der Dekretsbahnen nach Bedarf richtet. Aus Fig. 23 geht der Einbau dieses Umformers in den elektrischen Anlagen der BKW hervor, während Fig. 24 eine photographische Aufnahme des Umformers darstellt. Ueber diese Anlage wird an anderer Stelle demnächst eine Beschreibung erscheinen. — Ueber die Anlage Seebach, die sich nun bereits seit 2 Jahren im regulären Betrieb befindet, wird in einer nächsten Nummer des Bulletin berichtet.

Frequenzstabile Ueberlagerungs-Tongeneratoren.

Von H. Meyer, Zürich.

(Mitteilung aus dem Hochfrequenzlaboratorium der Eidg. Techn. Hochschule, Zürich [ETH]).

621.396.615.11 : 681.89

Die Ursachen der Frequenzschwankungen von Ueberlagerungstongeneratoren werden angegeben und die prinzipiellen Möglichkeiten zur Stabilisierung diskutiert. Anschliessend wird ein im Laboratorium für Hochfrequenztechnik an der E.T.H. gebauter Tongenerator beschrieben, bei welchem mit einfachem Aufbau eine gute Frequenzstabilität erreicht wurde.

L'auteur expose les causes des variations de fréquence dans les générateurs de son à interférence, et discute en principe les moyens propres à la stabilisation. Il décrit ensuite un générateur de son construit dans le laboratoire de haute fréquence de l'EPF, avec lequel il a été possible d'obtenir par des moyens très simples une bonne stabilité de la fréquence.

Tongeneratoren nach dem Ueberlagerungsverfahren, bei denen die Niederfrequenz f_N durch Ueberlagerung und Gleichrichtung als Differenz von zwei hochfrequenten Schwingungen f_1 und f_2 erzeugt wird ($f_N = f_1 - f_2$), haben gegenüber der direkten Erzeugung der Niederfrequenz bedeutende Vorteile, wie zum Beispiel die Verwendung kleinerer und leichter Induktivitäten und Kapazitäten, sofern es nur gelingt, die nötige Frequenzkonstanz zu erreichen. Im folgenden soll nun gezeigt werden, welche Möglichkeiten hier bestehen und was auf diesem Gebiete schon erreicht worden ist.

Zuerst soll der weitaus wichtigste Faktor der Frequenzinstabilität, nämlich die Abhängigkeit der Frequenz von den Betriebsspannungen, behandelt werden.

Die Ursache der Frequenzabhängigkeit von Heizung und Anodenspannung ist die, dass sich die inneren Röhrenwiderstände \mathfrak{R}_g (Gitter-Kathode) und \mathfrak{R}_i (Anode-Kathode) mit diesen Grössen ändern. Diese inneren Widerstände, genauer gesagt Impedanzen, sind den Kapazitäten oder Induktivitäten des Schwingungskreises parallel geschaltet und verändern die gegenseitige Phasenlage von Gitterspannung \mathfrak{E}_g , Anodenspannung \mathfrak{E}_a , Gitterstrom \mathfrak{I}_g und Anodenstrom \mathfrak{I}_a , so dass die Röhre wie eine variable zusätzliche Reaktanz die Eigenfrequenz des Schwingungskreises verändert (Fig. 1, Lit. ¹) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11). Als weitere Ursache der Frequenzabhängigkeit sind auch Harmonische des Stromes zu nennen, da diese je nach den Betriebsdaten in verschiedenem Masse auftreten und die Verteilung der Blindenergie im Schwingungskreise beeinflussen. Beim Dynatronoszillator insbesondere sind die Harmonischen ausschlaggebend für die

Frequenzstabilisation, während sie beim Triodenoszillator klein gehalten werden können und gegenüber den anderen Einflüssen meist zu vernachlässigen sind (Lit. 12 ²).

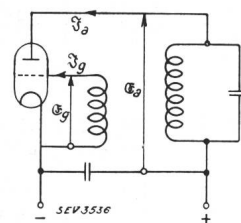


Fig. 1.

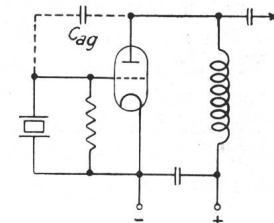


Fig. 2.

Um frequenzstabile Oszillatoren zu bauen, stehen uns nun 5 prinzipiell verschiedene Wege offen, nämlich: 1. Feste Oszillatoren mit Schwingquarz, 2. Quarzoszillatoren mit Verstimmung, 3. Oszillatoren mit kleiner Impedanz des Schwingungskreises, 4. Selektive Rückkopplung, 5. Phasenkompenzierte Oszillatoren.

1. Der schwingende Quarzkristall ist infolge seiner äusserst geringen Dämpfung sehr frequenzkonstant und wird ja in ausgedehntem Masse zur Steue-

²) Die in der angeführten Abhandlung (12) gegebene Ableitung stimmt für den Dynatronoszillator, für den Triodenoszillator jedoch nur beschränkt. Nach Groszkowski wäre nämlich bei Abwesenheit von Harmonischen, d. h. Arbeiten an linearer Charakteristik, das $\Delta\omega = 0$, während auch in diesem Fall eine Frequenzänderung infolge der Phasenverschiebung vorhanden ist. Der Fehler liegt darin, dass in den Impedanzen des Triodenoszillators die Widerstände vernachlässigt wurden, die Röhre also gar nicht vorhanden zu sein brauchte. Der innere Grund dieses verschiedenen Verhaltens von Dynatron- und Triodenoszillator ist der, dass beim Dynatron stets \mathfrak{I}_g und \mathfrak{I}_a in Phase sind, bei der Triode jedoch wohl \mathfrak{I}_g und \mathfrak{I}_a mit $\mathfrak{E}_{st} = \mathfrak{E}_g + D\mathfrak{E}_a$, nicht aber mit $-\mathfrak{E}_a$ und \mathfrak{E}_g in Phase sind (Fig. 1).

¹) Siehe «Literatur» am Schluss des Artikels.