

Spannungsregelung mit Gleittransformatoren

Von

Dr.-Ing. O. Löbl und **N. Hammerl**

Berlin

Wesel

Mit 40 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1933

ISBN 978-3-642-98439-6 ISBN 978-3-642-99253-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-99253-7

**Alle Rechte, insbesondere das
der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.**

Vorwort.

Spannungsregelnde Transformatoren ohne Kontakte stehen wieder im Vordergrund des Interesses. Über einen neuartigen Regeltransformator dieser Art wird im nachstehenden berichtet. Die Darstellung enthält sich aller schwierigen Untersuchungen und unterrichtet nur über Wirkungsweise und Anwendung. Theoretische Betrachtungen und eine exakte Berechnungsmethode sollen an anderer Stelle gebracht werden.

An der Entwicklung und praktischen Durchbildung des Transformators hat Herr N. Hammerl vom RWE in Wesel großen Anteil.

Berlin, Mai 1933.

Oskar Löbl.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Allgemeines über Spannungsregelung	1
1. Zweck	1
2. Arten von Regeltransformatoren	1
II. Der Gleittransformator	3
1. Wirkungsweise	3
2. Aufbau der aktiven Teile	5
III. Anwendungen des Gleittransformators	7
1. Leistungsregelung	7
a) Primär- und Sekundärseite elektrisch getrennt	7
b) Primär- und Sekundärseite leitend verbunden	8
2. Netzregelung	9
a) Allgemeines	9
Vorstufe und Regulierwicklung. — Spannungsabfall. — Auto- matik.	
b) Gleittransformator im Niederspannungsnetz	12
c) Gleittransformator im Hochspannungsnetz	15
Ausführbarkeit. — Drehung des Spannungsvektors.	
IV. Ausgeführte Gleittransformatoren	17
1. Gleittransformator für Niederspannung	17
2. Gleittransformator für Hochspannung	19

I. Allgemeines über Spannungsregelung.

1. Zweck.

Die Spannungsregelung dient vorwiegend zwei Zwecken: entweder eine schwankende Spannung konstant zu halten oder eine zugeführte im wesentlichen konstante Spannung in einem größeren Bereich zu verändern.

Im ersten Falle handelt es sich beispielsweise darum, den Spannungsabfall von Leitungen auszugleichen, um den Konsumenten unabhängig von der Belastung eine konstante Spannung zu liefern. Die Regelung kann sowohl im Hoch- als auch im Niederspannungsnetz erfolgen. Tritt der Spannungsabfall im Hochspannungsnetz auf, so empfiehlt es sich, hochspannungsseitig oder unmittelbar hinter dem Stationstransformator niederspannungsseitig zu regeln. Liegt jedoch der unzulässige Spannungsabfall im Niederspannungsnetz, was durch den wachsenden Anschluß von Stromverbrauchern, z. B. von Kochherden, Warmwasserspeichern, Raumheizung, Kühlschränken und anderen Haushaltgeräten häufig der Fall ist, dann erfolgt die Spannungsregelung zweckmäßig an einer geeigneten Stelle des Niederspannungsnetzes.

Eine stark veränderliche Spannung wird u. a. in der chemischen, metallurgischen und in der Glasindustrie benötigt. Im Ofenbetriebe z. B. kommt es oft auf konstante Temperatur an; diese läßt sich durch genügend feinstufige Spannungsregulierung erreichen. Spannungsänderungen braucht man ferner für Prüftransformatoren, Einankerumformer, Wechselstrombahnmotoren, Gleichrichter und Umrichter.

2. Arten von Regeltransformatoren.

Es kommen in erster Linie zwei Arten von Reguliertransformatoren in Frage:

1. Reguliertransformatoren mit Regulierschalter (Anzapftransformatoren) und
2. Reguliertransformatoren mit gegeneinander verschiebbaren Wicklungen.

Die zweite Gruppe kann man noch einmal aufteilen nach der Bewegungsart, und zwar in solche:

- a) mit Drehbewegung (Drehtransformatoren),
 b) mit geradliniger Bewegung.

Beim Anzapftransformator (auch Stufentransformator genannt) ist die Wicklung mit Anzapfungen versehen. Um die Spannung zu regeln, wird von Anzapfung zu Anzapfung weiter geschaltet. Soll unter Last



Abb. 1. Kontakte von Regulierschaltern nach längerem Betrieb.

geschaltet werden, so sind Spezi- schalter notwendig. Die Kontakte werden aber schon im normalen Betrieb stark abgenutzt (Abb. 1) und müssen regelmäßig in gewissen Zeitabständen überholt oder erneuert werden. Überdies bilden die Kontakte immer eine Gefahrenquelle. Durch Hängenbleiben von Kontakten entstehen Kurzschlüsse im Transformator, die zu seinem Zusammenbruch führen können.

Deswegen haben schon immer jene Transformatoren großes Interesse gefunden, die ohne Regulierschalter arbeiten, in denen also keine Schaltkontakte vorhanden sind. Bei diesen Transformatoren erfolgt die Regulierung durch gegenseitige Verschiebung von Primär- und Sekundärwicklung, d. h. durch Veränderung ihrer Gegeninduktivität. Wie erwähnt, unterscheidet man hier Transformatoren mit Dreh-

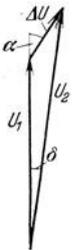


Abb. 2. Spannungsdiagramm des Einfach-Drehreglers.

bewegung und mit geradliniger Bewegung. Zur ersten Gruppe gehört der aus dem Asynchronmotor entwickelte Drehregler. Ihm haftet eine Reihe von Nachteilen an: großer Leerlaufstrom, starke Streuung, hohe Verluste und geringe Kurzschlußfestigkeit. Auch wachsen die Isolationsschwierigkeiten bei Spannungen über 6000 Volt erheblich an. Bei höheren Spannungen wird es daher aus Gründen des Preises und der Betriebssicherheit vorteilhaft sein, den Drehregler für kleinere Spannungen auszulegen und Zwischentransformatoren, sog. Isoliertransformatoren, zu verwenden (vgl. Abb. 27 und 28). Schließlich haben die Drehregler den Übelstand, daß Primär- und Sekundärspannung im allgemeinen verschiedene Phasenlage haben, was in manchen Fällen, z. B. bei Zusatzschaltung, nicht erwünscht ist. Abb. 2 zeigt die Spannungsverhältnisse eines Drehreglers. U_1 ist die unregelte, U_2 die ge-

regelte Spannung, ΔU die Zusatzspannung. Die Spannungsvektoren U_1 und U_2 schließen den Winkel δ miteinander ein. Um diese Drehung des Spannungsvektors zu vermeiden, kuppelt man zwei Regler mit entgegengesetzter Phasendrehung (Doppeldrehregler). Abb. 3 zeigt das Diagramm. ΔU_1 ist die Zusatzspannung des einen Reglers, ΔU_2 die des anderen Reglers und ΔU die resultierende Zusatzspannung. Die unregelte Spannung U_1 und die geregelte U_2 sind also in Phase. Diese Bauart hat außer den schon genannten Mißständen noch den hoher Anschaffungskosten.

Von diesen Nachteilen sind die kontaktlosen Regeltransformatoren mit geradliniger Bewegung frei. Trotz vieler Anstrengungen ist bisher nur ein praktisch brauchbarer Regler dieser Art auf den Markt gekommen: der Schubtransformator. Im nachstehenden soll ein neuer Regler beschrieben werden: der Gleittransformator. Er zeichnet sich durch niedrigen Preis und kleinen Platzbedarf aus und kann in Netze mit Betriebsspannungen bis zu 25000 Volt ohne Zuhilfenahme von Isoliertransformatoren eingebaut werden.



Abb. 3.
Spannungsdia-
gramm
des Doppeldreh-
reglers.

II. Der Gleittransformator.

1. Wirkungsweise.

Zum leichteren Verständnis soll der Gleittransformator zunächst in einphasiger Anordnung beschrieben werden. Wir legen eine Schaltung gemäß Abb. 4 zugrunde, bei der Primär- und Sekundärwicklung voneinander getrennt sind. Der Transformator ist also nicht als Zusatztransformator geschaltet, so daß wir einfache Verhältnisse haben. Auch ist die später noch zu besprechende Vorstufe nicht vorhanden.

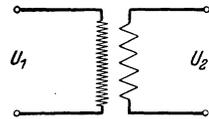


Abb. 4. Einfachste Schaltung
des Gleittransformators.

Der Gleittransformator ist aus einem feststehenden und einem beweglichen Teil zusammengesetzt (Abb. 5). Der feststehende Teil besteht aus den genuteten Eisenpaketen 1 und 2, in denen die Sekundärwicklung, gebildet aus den beiden Spulengruppen 3 und 4, liegt. Zwischen den beiden Ständerpaketen 1 und 2 bewegt sich der Gleiter mit den beiden Gleitstücken 5 und 6. Die Gleitstücke tragen die Primärwicklungsgruppen 7 und 8. Die Primärwicklung liegt am Netz und erregt den magnetischen Fluß Φ .

Wir betrachten verschiedene Gleiterstellungen. Abb. 5 zeigt links die obere Stellung, die wir als Anfangsstellung bezeichnen. Der

Fluß Φ verläuft durch das Gleitstück 5 über den Ständerrücken von 1 zum Gleitstück 6 und schließt sich über den Ständerrücken von 2 zurück. Er durchsetzt hierbei die beiden Spulengruppen 3 und

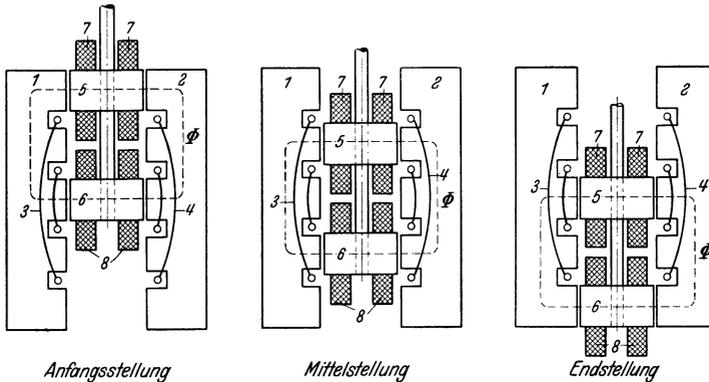


Abb. 5. Charakteristische Regelstellungen eines Gleittransformators.

4 der Sekundärwicklung und erzeugt in ihnen eine Spannung $-U_2$, wobei das negative Vorzeichen willkürlich gewählt ist.

In der Mittelstellung (Abb. 5 Mitte) tritt in die Sekundärwicklung ein gleich großer Fluß ein wie aus; der Gesamtfluß ist Null, so daß die Sekundärspannung ebenfalls Null ist.

In der unteren Stellung des Gleiters, der Endstellung (Abb. 5 rechts), befindet sich das Gleitstück 5 an der Stelle, in der das Gleitstück 6 in der Anfangsstellung gestanden hat. Der Fluß durchsetzt somit jetzt die Sekundärwicklung in der umgekehrten Richtung als in der Anfangsstellung, so daß die erzeugte Spannung den entgegengesetzten Wert hat wie dort, also $+U_2$.

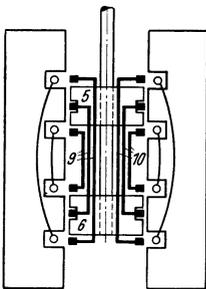


Abb. 6.
Gleittransformator mit
Dämpferwicklung.

Regelt man demnach von der Anfangs- zur Endstellung, d. h. bewegt sich der Gleiter von seiner oberen in seine untere Lage, so durchläuft die Sekundärspannung alle Werte von $-U_2$ über Null bis $+U_2$.

Die Gleittransformatoren werden, wie Abb. 6 zeigt, mit einer Dämpferwicklung, bestehend aus zwei Gruppen 9 und 10 ausgeführt, die in Nuten der Gleitstücke 5 und 6 und parallel zur Sekundärwicklung liegen. Den Zweck dieser Dämpferwicklung werden wir später kennenlernen.

2. Aufbau der aktiven Teile.

Ein einphasiger Gleittransformator besteht aus zwei Ständerpaketen und zwei Gleitstücken. Jedes Ständerpaket ist in einzelne voneinander isolierte Teilpakete zerlegt. Die Bleche werden mit isolierten Bolzen zusammengepreßt. Der Ständer trägt in Nuten die Sekundärwicklung (Abb. 7).

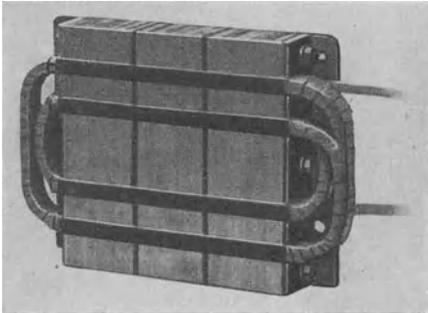


Abb. 7. Ständerpaket mit Sekundärwicklung.

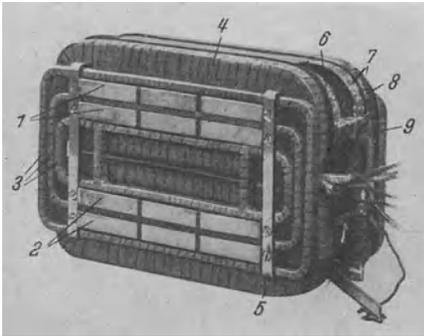


Abb. 8. Gleiter mit Dämpferwicklung, Primärwicklung und Vorstufe.

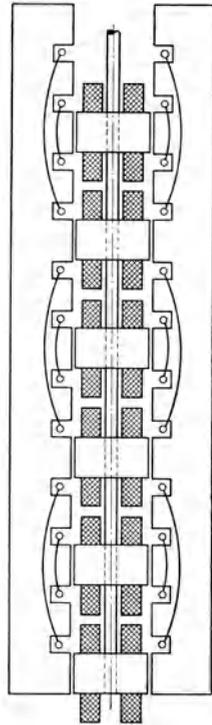


Abb. 9. Anordnung eines Drehstrom-Gleittransformators.

Zu einem Gleiter (Abb. 8) gehören zwei Gleitstücke 1 und 2, die übereinander angeordnet sind. Unmittelbar an der Gleitfläche liegt die Dämpferwicklung 3. Dahinter folgen zunächst die Teile 4 und 5 der Primärwicklung und dann die Vorstufe 6. Hierauf kommt in umgekehrter Reihenfolge: Vorstufe 7, Primärwicklung 8, Dämpferwicklung 9. Der Zweck der Vorstufe 6 und 7 wird später erläutert werden.

Ständer und Gleiter werden aneinandergepreßt, um ein Brummen zu vermeiden und den Leerlaufstrom gering zu halten. Durch eine besondere Konstruktion (Pressung durch das Eigengewicht einer Ständerhälfte, vgl. Abb. 31) wird eine sehr gleichmäßige Druckverteilung erzielt. Die Gleitflächen werden sorgfältig bearbeitet; eine Abnut-

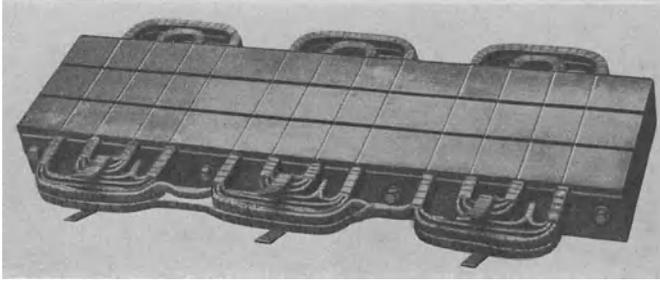


Abb. 10. Drehstrom-Gleittransformator. Ständerpaket mit Wicklung.

zung tritt nicht ein, da das Transformatorblech hart und der Druck auf die Gleitflächen gering ist.

Primär- und Sekundärwicklung werden zuverlässig abgestützt, so daß Kurzschlußkräfte ohne Schaden aufgenommen werden.

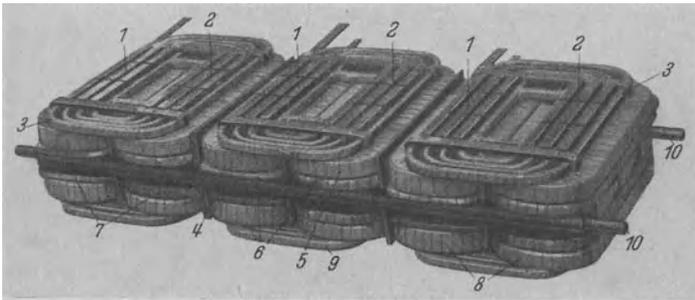


Abb. 11. Drehstrom-Gleittransformator. Gleiter mit Dämpferwicklung, Primärwicklung und Vorstufe.

Die Gleittransformatoren für Drehstrom bestehen aus 3 einphasigen Gleittransformatoren, die nebeneinander angeordnet werden können. Baut man sie übereinander (Abb. 9), so wird die Bauweise sehr vereinfacht. Abb. 10 veranschaulicht das Ständerpaket eines Drehstrom-Gleittransformators. Abb. 11 zeigt den Gleiter, bestehend aus den Gleitstücken 1 und 2 mit einem gemeinsamen Gestänge 10. Die Bezifferung der übrigen Teile dieser Abbildung stimmt mit der von Abb. 8 überein.

III. Anwendungen des Gleittransformators.

1. Leistungsregelung.

Bei der Leistungsregelung soll die Sekundärspannung verändert werden, während die gegebene Primärspannung im wesentlichen konstant ist. Hier handelt es sich meist um größere Regelbereiche. Die verschiedenen Schaltmöglichkeiten teilen wir in zwei Gruppen ein. Die erste umfaßt die Schaltungen, bei denen Primär- und Sekundärseite elektrisch getrennt sind; zur zweiten Gruppe gehören die Schaltungen, bei denen eine leitende Verbindung zwischen den beiden Seiten besteht.

a) Primär- und Sekundärseite elektrisch getrennt.

Die einfachste Schaltung zeigt Abb. 12. Der Transformator regelt, wie an Hand der Abb. 5 geschildert worden ist, von $-U_2$ bis $+U_2$. Da der Regelbereich von Null bis $-U_2$ dasselbe leistet wie der Regelbereich von Null bis $+U_2$, ist die Hälfte des gesamten Regelbereiches überflüssig. Um ihn auszunutzen, versehen wir den Gleittransformator mit einer zweiten Sekundärwicklung (der Vorstufe 6 und 7 der Abb. 11), die neben der Primärwicklung auf dem Gleiter sitzt und daher nicht regelbar ist. Sie ist mit der Sekundärwicklung auf dem Ständer (der Regelwicklung) in Reihe geschaltet (Abb. 13). Liefert die Vorstufe die Spannung U_V , die Regelstufe die Spannung U_R , so ist die niedrigste einregelbare Sekundärspannung

$$U_2' = U_V - U_R,$$

die höchste

$$U_2'' = U_V + U_R,$$

der Regelbereich also

$$2 U_R.$$

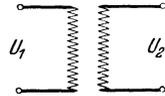


Abb. 12. Leistungsregelung. Schaltung ohne Vorstufe.

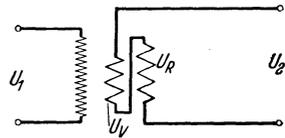


Abb. 13. Leistungsregelung. Schaltung mit Vorstufe.

Da, wie gesagt, eine negative Regelung zwecklos ist, machen wir

$$U_V \geq U_R.$$

Ist im besonderen $U_V = U_R$, so regelt der Transformator zwischen

$$U_2' = 0 \quad \text{und} \quad U_2'' = 2 U_R.$$

Meist ist aber $U_V > U_R$, also $U_2' > 0$.

Die Vorstufe kann man auch in einen besonderen Transformator Tr legen, der mit dem Gleittransformator GT primär parallel und sekundär in Reihe geschaltet ist. Dann erhält man die Schaltung Abb. 14.

b) Primär- und Sekundärseite leitend verbunden.

In den meisten Fällen wird eine elektrische Trennung der beiden Seiten nicht erforderlich sein. Dann empfiehlt sich, falls die Sekundärspannung sich der Größe nach nicht zu sehr von der Primärspannung unterscheidet, eine Zusatzschaltung (Abb. 15 bis 17). Die Primärwicklung wird von der ankommenden Spannung U_1 erregt.

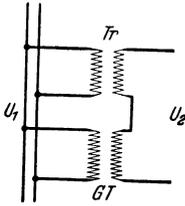


Abb. 14. Leistungsregelung. Gleittransformator und Vorstufe auf 2 Transformatoren verteilt.

Abb. 15 zeigt eine Schaltung ohne Vorstufe, Abb. 16 mit positiver, Abb. 17 mit negativer Vorstufe.

Wir betrachten den allgemeinen Fall der

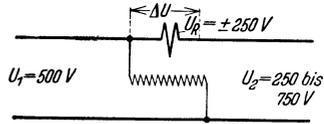


Abb. 15. Leistungsregelung. Zusatzschaltung ohne Vorstufe.

Abb. 16. Die niedrigste Sekundärspannung ist

$$U_2' = U_1 + U_V - U_R$$

und die höchste

$$U_2'' = U_1 + U_V + U_R.$$

Daraus folgt:

$$U_V = \frac{U_2'' + U_2'}{2} - U_1$$

und

$$U_R = \frac{U_2'' - U_2'}{2}.$$

U_V kann positiv oder negativ werden. Im ersten Fall wird die Schaltung nach Abb. 16, im zweiten nach Abb. 17 gewählt.

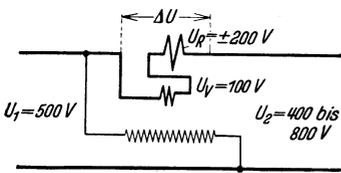


Abb. 16. Leistungsregelung. Zusatzschaltung mit positiver Vorstufe.

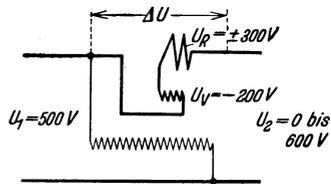


Abb. 17. Leistungsregelung. Zusatzschaltung mit negativer Vorstufe.

Beispiele:

1.) Abb. 15. $U_1 = 500$ Volt

U_2 regelbar von $U_2' = 250$ bis $U_2'' = 750$ V

$$U_V = \frac{750 + 250}{2} - 500 = 0 \text{ (keine Vorstufe)}$$

$$U_R = \frac{750 - 250}{2} = 250 \text{ V.}$$

2.) Abb. 16. $U_1 = 500 \text{ V}$
 U_2 regelbar von $U_2' = 400 \text{ V}$ bis $U_2'' = 800 \text{ V}$
 $U_V = \frac{800 + 400}{2} - 500 = +100 \text{ V}$ (positive Vorstufe)
 $U_R = \frac{800 - 400}{2} = 200 \text{ V}.$

3.) Abb. 17. $U_1 = 500 \text{ V}$
 U_2 regelbar von $U_2' = 0$ bis $U_2'' = 600 \text{ V}$
 $U_V = \frac{600 + 0}{2} - 500 = -200 \text{ V}$ (negative Vorstufe)
 $U_R = \frac{600 - 0}{2} = 300 \text{ V}.$

2. Netzregelung.

a) Allgemeines.

Vorstufe und Regulierwicklung. Bei der Netzregelung soll der durch die Belastung hervorgerufene Spannungsabfall wieder beseitigt werden. Die Spannung U_1 vor dem Gleittransformator („ankommende Spannung“) verändert sich also, die Spannung U_2 hinter dem Gleittransformator („abgehende Spannung“) soll konstant gehalten werden¹. Der Gleittransformator liegt in Zusatzschaltung (Abb. 18). Die Primärwicklung 1 liegt an der konstanten Spannung U_2 und erregt den Transformator, die Sekundärwicklung 2 hingegen liegt im Zug der Leitung. Die an der Sekundärwicklung auftretende, von der Primärwicklung her induzierte Spannung U_R addiert sich oder subtrahiert sich zur ankommenden Spannung U_1 und liefert so die abgehende Spannung U_2 . Meist handelt es sich darum, die Netzspannung zu erhöhen, selten darum, sie zu erniedrigen. Da aber der Regeltransformator nach beiden Richtungen hin um gleiche Beträge, aber mit verschiedenen Vorzeichen regelt, ist die negative Regelspannung ganz oder teilweise aufzuheben. Zu diesem Zwecke erhält der Gleiter eine Vorstufe (vgl. Abb.11), die neben der Primärwicklung aufgebracht und daher nicht regulierbar ist. Diese Vorstufe 3 (Abb.19) ist mit der Regulierwicklung 2 in Reihe

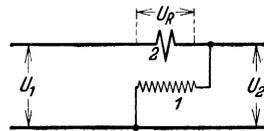


Abb. 18. Netzregelung. Zusatzschaltung ohne Vorstufe.

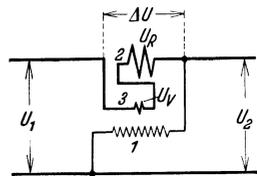


Abb. 19. Netzregelung. Zusatzschaltung mit positiver Vorstufe.

¹ Es soll nur dieser wichtigste Fall betrachtet werden.

geschaltet. Liefert die Vorstufe die Spannung U_V , so ist die niedrigste Zusatzspannung

$$\Delta U' = U_V - U_R$$

und die höchste

$$\Delta U'' = U_V + U_R.$$

Diese Grenzwerte der Zusatzspannungen, zwischen denen also die Regulierung erfolgen soll, werden gewöhnlich vom Besteller vorgeschrieben. Dann errechnet sich die Spannung der Vorstufe und der Regulierwicklung durch Addition und Subtraktion der beiden obigen Gleichungen:

$$U_V = \frac{\Delta U'' + \Delta U'}{2}$$

$$U_R = \frac{\Delta U'' - \Delta U'}{2}$$

und die abgehende Spannung bewegt sich zwischen

$$U_1 + U_V - U_R \quad \text{und} \quad U_1 + U_V + U_R.$$

Beispiel:

Die Netzspannung sinke von 220 V durch Belastung bis auf 190 V und soll auf 220 V konstant gehalten werden. Der Spannungsabfall von 30 V ist auszugleichen; es kommt also nur eine positive Zusatzspannung in Betracht. Aus

$$\Delta U' = 0 \quad \text{und} \quad \Delta U'' = 30 \text{ V}$$

folgt

$$U_V = U_R = \frac{\Delta U''}{2} = \frac{30}{2} = 15 \text{ V}.$$

Spannungsabfall. Zur ankommenden Spannung U_1 wird im Leerlauf eine Spannung ΔU_0 zugesetzt. Bei Belastung tritt im Gleittransformator ein Spannungsabfall auf, der aus zwei Teilen besteht, dem induktiven Spannungsabfall IX und dem Ohmschen Spannungsabfall IR . Hierin ist I der Belastungsstrom, R der totale Widerstand und X die totale Streureaktanz des Gleittransformators, bezogen auf die Sekundärwicklung. Die abgehende Spannung U_2 findet man also, indem man von der Leerlaufspannung $U_1 + \Delta U_0$ die

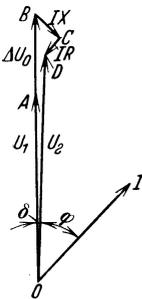


Abb. 20. Spannungsdiagramm mit den beiden Spannungsverlusten IR und IX .

Spannungsabfälle IR und IX vektoriell abzieht, vgl. Abb. 20. Die Spannung BD in Abb. 20 ist gleich der Kurzschlußspannung U_K beim Belastungsstrom I und die Spannung AD die bei Belastung noch vorhandene Zusatzspannung ΔU . Man kann daher dem

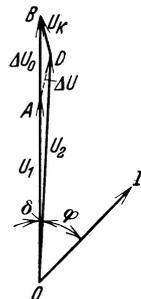


Abb. 21. Spannungsdiagramm mit dem resultierenden Spannungsverlust U_K .

Spannungsabfälle IR und IX vektoriell abzieht, vgl. Abb. 20. Die Spannung BD in Abb. 20 ist gleich der Kurzschlußspannung U_K beim Belastungsstrom I und die Spannung AD die bei Belastung noch vorhandene Zusatzspannung ΔU . Man kann daher dem

Diagramm auch die Gestalt der Abb. 21 geben. Die Zusatzspannung bei Belastung ist also

$$\Delta U = \Delta U_0 - U_K,$$

d. h. sie ist gleich der Zusatzspannung ΔU_0 bei Leerlauf, vektoriell vermindert um die Kurzschlußspannung U_K . Die Kurzschlußspannung kann nach der in Abb. 22 angegebenen Schaltung gemessen werden.

Trifft man keine besonderen Maßnahmen, so ist die den Spannungsabfall bestimmende Kurzschlußspannung U_K in der Anfangs- und Endstellung des Gleiters klein und hat einen Höchstwert in der Mittelstellung.

Um U_K aber in allen Regelstellungen (Gleiterstellungen) möglichst kleinzuhalten, erhält der Gleittransformator eine Dämpferwicklung, bestehend (vgl. Abb. 6) aus den beiden Gruppen 9 und 10, die in Nuten der Gleitstücke liegen und von einem Gleitstück zum anderen reichen (vgl. auch Wicklung 3 in der Abb. 8 und 11). Diese Dämpferwicklung wirkt dem spannungsrosselnden Fluß der Sekundärwicklung um so mehr entgegen, je weiter der Gleiter sich der Mittelstellung nähert. In den beiden Grenzstellungen dagegen besorgt dies die Primärwicklung.

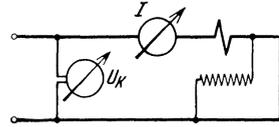


Abb. 22. Schaltung zur Messung der Kurzschlußspannung.

Automatik. Bei Netzregelung soll die Spannung konstant gehalten werden. Diese Aufgabe übernimmt die Automatik. Bei Spannungsschwankungen ändert sie selbsttätig die Regelstellung, d. h. die Gleiterstellung, und dadurch die Größe der zu- oder abgesetzten Spannung.

Die Automatik (Abb. 23) besteht aus einem Spannungstransformator mit der Primärwicklung 1, der Sekundärwicklung 2 für 100 V und einer zweiten Sekundärwicklung 3 für 42 V; ferner aus einem Spannungsrelais 4 mit den Kontakten 5 und 6; und schließlich aus den beiden Schützen 7 und 8 mit den Einschaltpulen 9 und 10 und den Verriegelungskontakten 16 und 17. Die Sekundärwicklung 2 speist das Spannungsrelais 4, die Sekundärwicklung 3 den Steuerstromkreis.

Die Wirkungsweise ist die folgende. Fällt die Netzspannung, so wird der Kontakt 5 geschlossen, der Motor 11 über das Schütz 7 eingeschaltet und der Gleiter abwärts bewegt, bis die Spannung den eingestellten Wert erreicht hat. Dadurch wird die Spannungsspule mehr erregt und der Kontakt 5 wieder geöffnet. Steigt hingegen die Netzspannung, so wird der Kontakt 6 geschlossen und der Motor über das Schütz 8 im anderen Umlaufsinn eingeschaltet, so daß der Gleiter gehoben wird, bis die Spannung wieder auf den eingestellten Wert gefallen ist. Die Kontakte

5 und 6 sind Quecksilberschalter, bei denen kein Abbrand eintritt, so daß das Relais dauernd zuverlässig arbeitet. Kommt der Gleittransformator in eine Grenzstellung, so wird der Steuerstrom durch den Endschalter 12 bzw. 13 unterbrochen und ein Überfahren der Grenzstellung unmöglich gemacht.

Die Ansprechspannung des Relais kann durch den Widerstand 24 geändert werden. Die Empfindlichkeit stellt man etwa auf 1,5 bis 2% ein. Eine größere Empfindlichkeit ist vorgesehen, im allgemeinen aber nicht notwendig.

Mit dem Umschalter 14 kann von automatischer Regulierung auf

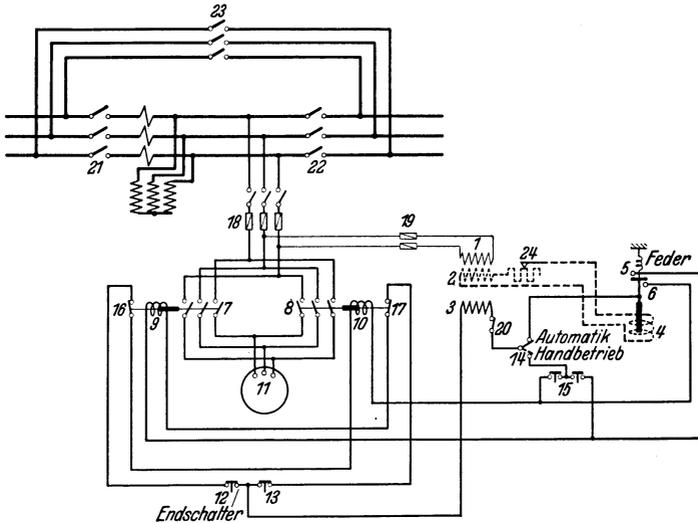


Abb. 23. Schaltschema der Automatik.

Druckknopfsteuerung (Druckknöpfe 15) umgeschaltet werden. 18 und 19 sind Sicherungen für den Motorkreis und den Spannungstransformator und 20 ein Schalter für den gesamten Steuerstromkreis. 21, 22 und 23 sind Schalter, mit denen der Gleittransformator in Betrieb genommen bzw. vom Netz getrennt werden kann, wobei der Betrieb nicht unterbrochen wird.

b) Gleittransformator im Niederspannungsnetz.

Die Einbaustelle eines Gleittransformators in einem Niederspannungsnetz richtet sich nach dem Ursprung der Spannungssenkung. Wir unterscheiden zwei Fälle:

1. Der Spannungsabfall liegt in der Hochspannungsleitung, d. h.

der Stationstransformator liefert an das Niederspannungsnetz eine zu kleine Spannung.

2. Der Spannungsabfall hat seinen Sitz in der Niederspannungsleitung, also hinter dem Stationstransformator.

Im ersten Fall stellt man zweckmäßig einen Regeltransformator in der Station auf. Abb. 24 zeigt eine solche Aufstellung. Durch die geöffnete Tür sieht man die Schalttafel für den Regler.



Abb. 24. Gleittransformator in einer Station.

Im zweiten Fall wird man den Regeltransformator in die Niederspannungsleitung etwa dort einbauen, wo der gesamte Spannungsabfall etwa seinen halben Wert erreicht hat. Diese Stelle kann man z. B. durch Messung feststellen, indem man am Anfang, in der Mitte und am Ende der Leitung zwischen den gleichen Phasen registrierende Voltmeter einbaut und so das Spannungsgefälle der Leitung bestimmt. Der Regeltransformator kann auf dem Mast oder auf dem Erdboden neben dem Mast aufgestellt werden.

Abb. 25 zeigt einen Gleittransformator auf einem Mast. Um eine möglichst einfache Montage zu erzielen, ist zwischen zwei Masten eine Bühne errichtet, auf der Transformator und Schaltschrank stehen. Materialaufwand und Montagekosten sind gering. In Abb. 25 sieht

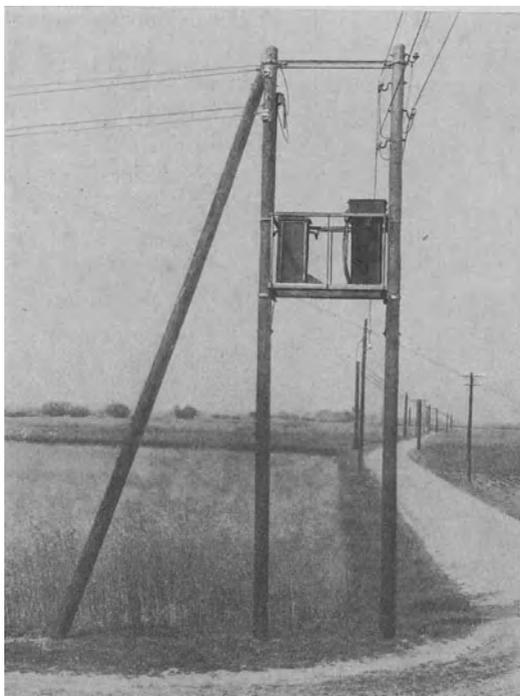


Abb.25. Gleittransformator auf einem Mast.

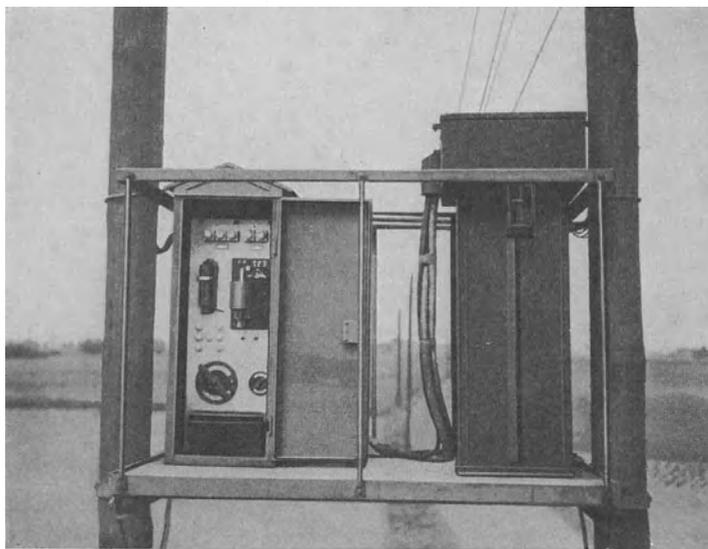


Abb.26. Gleittransformator auf einem Mast. Links Schaltschrank mit Automatik.

man links die ankommende Leitung mit der unregulierten Spannung, rechts zwei abgehende Leitungen mit der regulierten (konstanten) Spannung. Abb. 26 zeigt vergrößert links den Schaltschrank mit der Automatik, rechts den Transformator.

c) Gleittransformator im Hochspannungsnetz.

Ausführbarkeit. Die Schaltungen der Abb. 18 und 19 sind für Betriebsspannungen bis 25 kV anwendbar. Bei höheren Spannungen verwendet man in bekannter Weise Isoliertransformatoren. Der Gleittransformator kann dann für eine geeignete niedrige Spannung ausgeführt werden. In Abb. 27 stellt *GT* den Gleittransformator, *ET* und *ZT* Isoliertransformatoren dar (*ET* Erregertransformator, *ZT* Zusatztransformator). Abb. 28 zeigt eine dreiphasige Ausführung mit einem Umgehungschalter *1* und zwei Trennschaltern *2* und *3*. Diese Schalter dienen dazu, die Transformatoren ohne Unterbrechung der Stromlieferung in Betrieb und aus dem Betrieb zu nehmen. In beiden Fällen wird der Gleittransformator

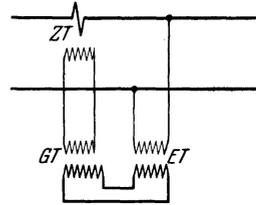


Abb. 27. Schaltung eines Einphasen-Gleittransformators mit Isoliertransformatoren.

zunächst in diejenige Regellestellung gebracht, in der die Zusatzspannung $\Delta U = 0$ ist; dann werden die Schalter betätigt.

Drehung des Spannungsvektors. Die bisher geschilderten Anordnungen arbeiten ohne Verdrehung der Phasenlage des Spannungsvektors. In manchen Fällen, z. B. beim Zusammen-

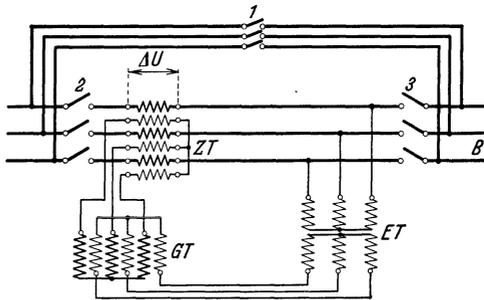


Abb. 28. Schaltung eines Drehstrom-Gleittransformators mit Isoliertransformatoren und Umgehungschalter.

schluß von Ringleitungen, ist es notwendig, daß die Zusatzspannung nicht in Phase ist, sondern einen Winkel gegen die ankommende Spannung bildet. In Abb. 29 ist ein solcher Fall dargestellt. *K* sei ein Kraftwerk, von dem die Leitungen *a* und *b* ausgehen. Will man die Leitungen bei *S* zusammenschließen, so ist dies nur dann ohne weiteres möglich, wenn die Spannung ΔU zwischen den Schalterkontakten derselben Phase Null ist (vgl. das eingezeichnete Voltmeter).

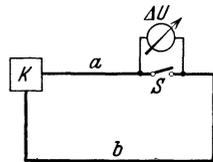


Abb. 29. Schema einer Ringleitung mit Kupplungsschalter.

Dies ist im allgemeinen nicht der Fall, da die Spannungsabfälle auf den Leitungen a und b verschieden sein werden, und zwar sowohl dem Betrag als auch der Phasenlage nach. In Abb. 30 sei U_1 die Phasenspannung der Leitung a , U_2 die der Leitung b und ΔU die Spannung zwischen den Kontakten derselben Phase. Diese Spannung ΔU kann man durch einen Doppelgleittransformator beseitigen. Der eine Gleittransformator regelt in Phase mit U_2 d. h. er liefert die „Längsspannung“ U_l ; der andere regelt senkrecht zu U_2 und liefert die „Querspannung“ U_q . Durch dieses Zusetzen von ΔU verschwindet die Spannung am Schalter, der dann geschlossen werden kann.

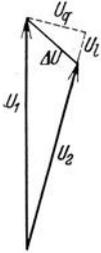


Abb. 30. Spannungen an der Kupplungsstelle.

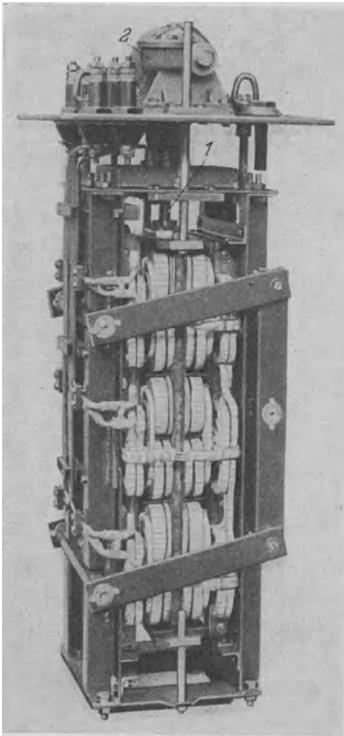


Abb. 31. Gleittransformator (ausgebaut) für eine Durchgangsleistung von 50 kVA und eine Regelung von 0 bis 16% Netzspannung 400 Volt.

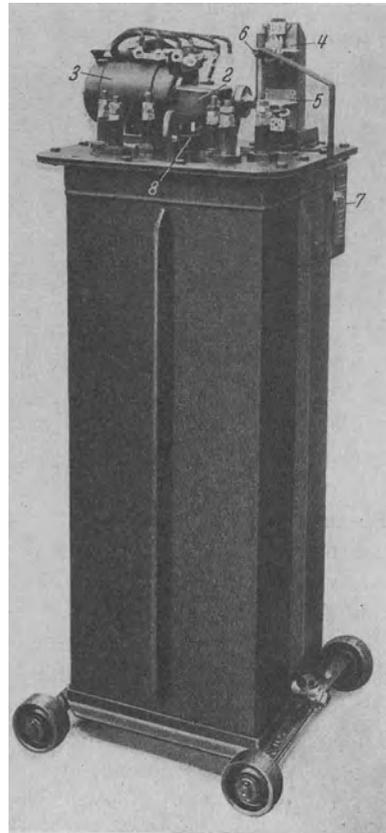


Abb. 32. Gleittransformator der Abb. 31 im Gefäß.

IV. Ausgeführte Gleittransformatoren.

1. Gleittransformator für Niederspannung.

Abb. 31 zeigt die Ansicht eines Niederspannungsreglers im ausgebauten Zustand, Abb. 32 im Gefäß. Er hat bei einer Durchgangsleistung von 50kVA und einer Spannung von 420/400 V einen Regelbereich von 0 bis 16%. Der Gleiter sitzt auf einer Spindel 1, die unter Zwischenschaltung eines Getriebes 2 von einem Motor 3 angetrieben wird. Die Einschaltung des Motors erfolgt mit Druckknopf- oder Relaissteuerung. Der Gleiter ist oben und unten geführt. Auf dem Deckel (Abb. 32) befinden sich die beiden Endabschalter 4 und 5, die als Quecksilberschalter ausgebildet sind. Sie werden durch einen Stift 6, der sich fest mit dem Gleiter bewegt, beim Erreichen der Anfangs- und der Endstellung betätigt. Der Steuerstrom wird dadurch unterbrochen und der Motorstrom abgeschaltet, so daß die Grenzstellungen nicht über-

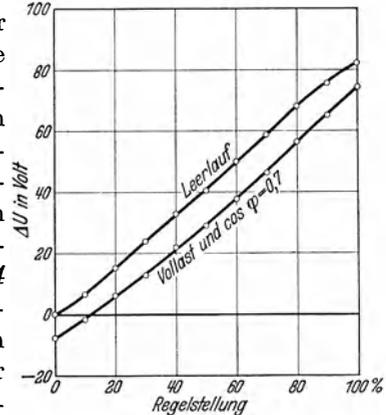


Abb. 33. Regulierkurven des Gleittransformators der Abb. 31.

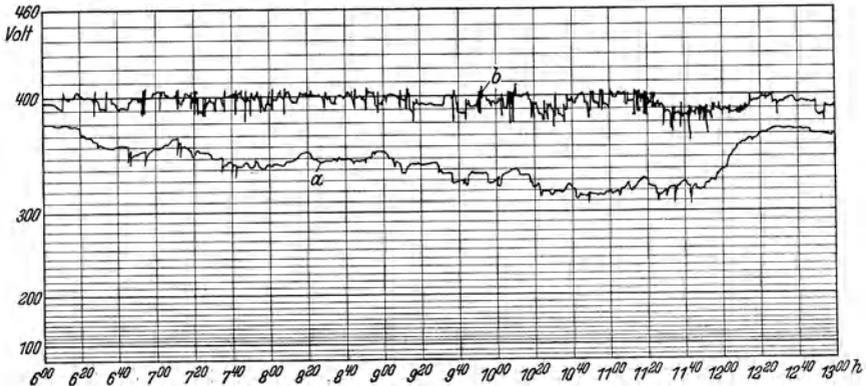


Abb. 34. Registrierstreifen. Kurve a: ankommende Spannung unmittelbar vor dem Gleittransformator, Kurve b: abgehende Spannung 2 km dahinter.

fahren werden können. Über Deckel befindet sich ein mechanischer Kernstellungsanzeiger 7, der die jeweilige Gleiterstellung angibt, ferner

ein Entlüftungsstutzen δ und ein Meßrohr zur thermometrischen oder fernelektrischen Temperaturüberwachung.

Abb. 33 gibt Regulierkurven dieses Gleittransformators wieder, d. h. die Zusatzspannung ΔU in Abhängigkeit von der Gleiterstellung (Regelstellung), und zwar die obere Kurve bei Leerlauf, die untere bei

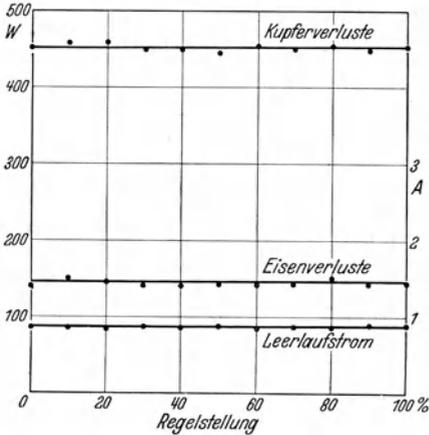


Abb. 35. Leerlaufstrom und Verluste des Gleittransformators der Abb. 31.

Gesamtverluste betragen $0,6 \text{ kW} = 1,2\%$ der Durchgangsleistung, sind also verschwindend klein.

Der Gleittransformator muß — gemäß R.E.T./1930 § 80 — den

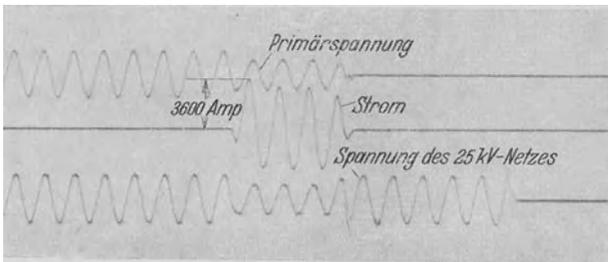


Abb. 36. Oszillogramm bei plötzlichem Klemmenkurzschluß am Gleittransformator der Abb. 31.

50fachen Nennstrom aushalten, ohne betriebsunfähig zu werden. Abb. 36 zeigt ein Oszillogramm einer solchen Festigkeitsprobe mit Stoßkurzschlußstrom. Der Gleittransformator lag hierbei in Zusatzschaltung, wie er im Netz benutzt wird. Gespeist wurde er aus einem 100 kV-Netz

über einen 100 kV/25 kV- und einen 25 kV/400 V-Transformator. Das Oszillogramm zeigt oben den Verlauf der Primärspannung des Gleittransformators, in der Mitte den Kurzschlußstrom und unten die Spannung des 25 kV-Netzes. Der Effektivwert des Betriebsstromes ist 72 A;

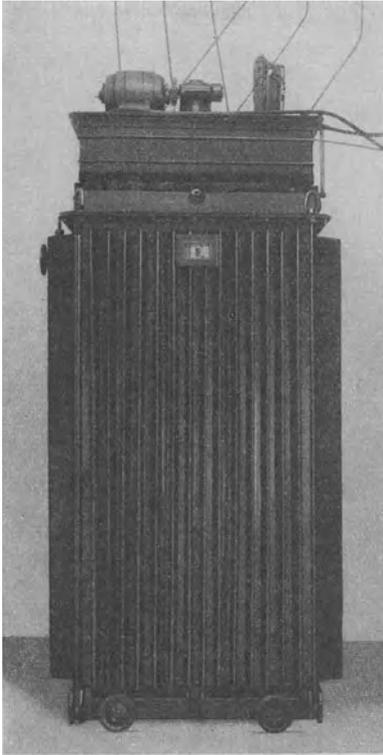


Abb. 37. Gleittransformator für eine Durchgangsleistung von 500 kVA und eine Regelung von -8 bis $+16\%$. Netzspannung 10 000 V.

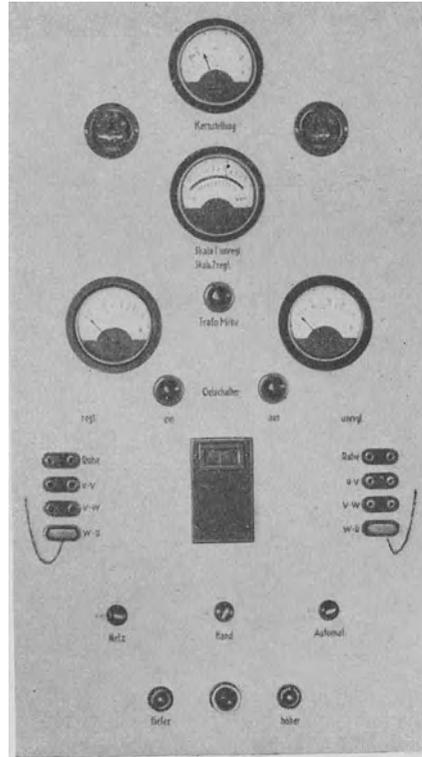


Abb. 38. Bedienungsfeld für den Gleittransformator der Abb. 37.

der Stoßstrom betrug 3600 A, also fast genau das 50fache. Der Gleittransformator wurde einer dreimaligen Kurzschlußprobe unterworfen.

2. Gleittransformator für Hochspannung.

Abb. 37 zeigt einen Gleittransformator für Hochspannung in einer Zelle. Dieser Gleittransformator ist für direkten Einbau in ein 10 kV-Netz ausgeführt ohne Verwendung von Isoliertransformatoren. Die Durchgangsleistung bei Selbstkühlung beträgt 500 kVA bei einer Regelung von -8 bis $+16\%$. Ölumlaufkühlung zur Erhöhung der

Durchgangsleistung ist vorgesehen. Abb.38 gibt eine Ansicht des zugehörigen Bedienungsfeldes in der Schaltanlage.

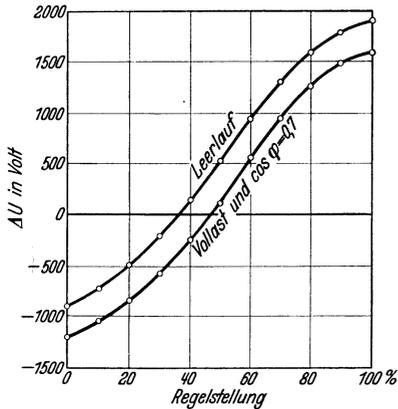


Abb. 39. Regulierkurven des Gleittransformators der Abb. 37.

Regulierkurven zeigt Abb. 39, und zwar ist wieder die Zusatzspannung ΔU bei Leerlauf und unter Vollast bei $\cos \varphi = 0,7$ aufgetragen. Leerlaufstrom,

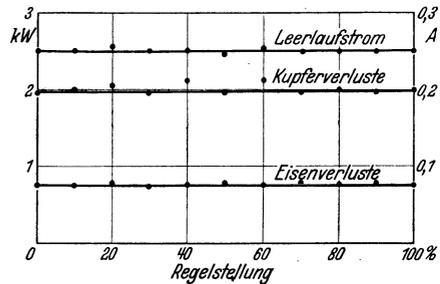


Abb. 40. Leerlaufstrom und Verluste des Gleittransformators der Abb. 37.

Eisen- und Kupferverluste sind in Abb. 40 wiedergegeben; sie sind über den ganzen Regelbereich praktisch konstant. Die Gesamtverluste betragen 0,55% der Durchgangsleistung.