

SAMMLUNG VIEWEG
ARBEITEN AUS DEN GEBIETEN
DER NATURWISSENSCHAFTEN
UND DER TECHNIK

Heft 118

Milan Vidmar

**Transformatoren-
kurzschlüsse**



**SPRINGER FACHMEDIEN
WIESBADEN GMBH**

Transformatorenkurzschlüsse

Von

Dr. techn. Milan Vidmar

ord. Professor an der jugoslawischen Universität Ljubljana



40 Abbildungen

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

1940

**Herausgeber dieses Heftes:
Prof. Dr.-Ing. A. Leonhard, Stuttgart**

ISBN 978-3-663-06422-0 ISBN 978-3-663-07335-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-07335-2

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1997

Alle Rechte vorbehalten

Vorwort

Es war mir vergönnt, das Entstehen der ersten Riesen der Transformatorwelt mitwirkend zu erleben und die Erinnerung an die beiden Jahre 1912 und 1913, die ich in Budapest, mit Großtransformatorproblemen beschäftigt, verlebt habe, ist noch unverblaßt. Aus jener Zeit begleiten mich die Kurzschlußprobleme des Transformators durch das Leben.

Im Laufe der Jahre veröffentlichte ich mehrere Studien über das Kurzschlußstromkraftproblem des Transformators. Man findet sie in der Wiener Fachzeitschrift E. und M. und in meinen beiden Büchern: „Die Transformatoren“, „Der Transformator im Betrieb“. Sie lassen das irrende und wieder zurechtfindende Suchen beobachten, das keinem Forscher erspart bleibt.

Sie lassen auch erkennen, daß meine Aufmerksamkeit lange Jahre nur der Kurzschlußstromkraft galt, daß das Kurzschlußstromwärmeproblem lange Zeit wenig Raum in meiner Gedankenwelt fand. In der Tat warf ich erst in den letzten Jahren in meinen Kurzschlußuntersuchungen das Steuer herum.

Es war schwer, sich von den rein statischen Bildern der Kurzschlußstromkräfterscheinungen loszulösen, von den Bildern der Jugendjahre des Großtransformatorbaus. Der Übergang zur Dynamik der Kurzschlußstromkräfte ist indessen schon in meinem 1927 erschienenen Buche „Der Transformator in Betrieb“ angedeutet. Beendet wird er erst in der vorliegenden Studie.

Das Kurzschlußstromwärmeproblem stieß mich deshalb lange ab, weil es mir als Problem unmöglich erschien. Überzeugt, daß jede Überschreitung der 110° C-Temperaturgrenze mit Recht unerlaubt

ist, hielt ich jeden Kurzschluß des Transformators für ein thermisches Verbrechen, zum mindesten für ein thermisches Vergehen. Verbrechen und Vergehen löst man nicht als Probleme, man bestraft sie oder man sieht, machtlos, an ihnen vorbei.

Als ich nun vor Jahren amerikanische Untersuchungen zu sehen bekam, die mit der Lebensdauer der wichtigsten Isolierstoffe beschäftigt, die alte 110° C-Temperaturgrenze in ein neues Licht rückten, wurde plötzlich das Kurzschlußstromwärmeproblem auch für mich ein richtiggehendes Problem.

Allmählich wuchs so in den letzten Jahren in mir das Gefühl, daß ich die Pflicht habe, alles in einem zusammenhängenden Gesamtbilde darzustellen, was ich in der Welt der Transformatorenkurzschlüsse erlebt, gesehen, erdacht und erdichtet habe.

Dreißig Jahre mit Transformatoren und ihren Problemen innig verbunden, habe ich mich allmählich zu einem höheren Aussichtspunkt emporgerungen und sehe deshalb viele Zusammenhänge, die noch wenig beachtet und bekannt sind. Es gibt keine isolierten, auch keine isolierbaren Probleme im Transformatorenbau. Das sehe ich klar.

Deshalb will die vorliegende Studie, den Transformatorenkurzschlüssen gewidmet, keine trockene Beschreibung der möglichen Kurzschlußfälle sein. Sie greift über das Kurzschlußgebiet nach allen Richtungen hinaus und will eigentlich den ganzen Transformatorenbau, allerdings nur von der Kurzschlußseite her, beleuchten.

Ob ihr das, was sie erreichen wollte, gelungen ist, wird der Leser zu beurteilen haben. Ob die gewählte Darstellungsart, die vielleicht erheblich von der im deutschen technischen Schrifttum üblichen abweicht, richtig und zweckmäßig ist oder nicht, wird ebenfalls der Leser selbst zu entscheiden haben. Es ist meine Darstellungsart und ich habe mich mit ihr abfinden müssen.

Herrn Dr.-Ing. A. Leonhard, ord. Professor an der Technischen Hochschule Stuttgart, verdanke ich außerordentlich wichtige Hinweise auf die neuzeitigen Bestrebungen, die Kurzschlußabschaltzeiten möglichst zu kürzen. Ich habe sie gerne verwertet.

Die Abbildungen, die die vorliegende Studie beleben sollen, wurden von meinem langjährigen Assistenten, Herrn Dr.-Ing. V. Bedjanić entworfen und gezeichnet. Er las auch die Korrekturen. Für seine wertvolle Hilfe schulde ich ihm großen Dank.

Ich hoffe, einem großen Leserkreis einen guten Überblick über die gefürchteten Kurzschlußerscheinungen des Transformators ermöglicht zu haben. Der schönste Lohn für meine langjährige, in dieser Studie ausgewertete Arbeit wird eine günstige Aufnahme des Buches sein.

Ljubljana, im Frühjahr 1940.

M. Vidmar.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
1. Physikalische und technische Probleme.....	1
2. Belastungserwärmung des Wicklungskupfers	4
3. Wicklungszerlegung in Spulen. Natürliche Luftkühlung....	8
4. Natürliche Ölkühlung. Künstliche Kühlung	15
5. Grenzstromdichten des Transformatorenbaus. Wirtschaftlichste Leistung	19
6. Belastungstemperatur und Lebensdauer des Transformators	23
7. Kurzschlußsicherheit des Transformators. Kurzschlußstromwärme- und Kurzschlußstromkraftproblem.....	27
I. Der dreiphasige Kurzschluß	34
8. Der symmetrische ungeschwächte dreiphasige Klemmenkurzschluß	34
9. Dauerkurzschlußstrom und Ausgleichskurzschlußstrom....	37
10. Spannungsabfälle des Transformators. Kurzschlußspannung	41
11. Kurzschlußproblem und Spannungsabfallproblem	46
12. Anzapfungen. Der regelbare Transformator	50
13. Kurzschlußstromwärme. Größenordnung der Kurzschlußstreufeldenergie	55
14. Energiebewegung im Kurzschluß	59
15. Die bewegliche Induktivität des Transformators.....	63
16. Induktivität und Stromkraft	67
17. Federnde Gestaltänderungen des Wicklungskörpers.....	71
18. Bleibende Gestaltänderungen des Wicklungskörpers.....	75
19. Der bewegliche Wirkwiderstand der kurzgeschlossenen Wicklung.....	79
20. Kurzschlußdauer, Überstromschutz und Lebensdauer....	83
21. Höchsttemperatur in der kurzgeschlossenen Wicklung. Abfluß der Kurzschlußstromwärme	86

	Seite
II. Der einphasige und der zweiphasige Kurzschluß.....	95
22. Das Grundgesetz des Nennleistungsgebiets und das Kurzschlußproblem	95
23. Der einphasige Kurzschluß und die Wesenssymmetrie des dreiphasigen Transformators	99
24. Der vereinfachte einphasige Kurzschluß. Zusatzstrom und Primärschaltung	103
25. Nullpunktverschiebung im einphasigen Kurzschluß	107
26. Zusatzkraftfluß. Jochinduktivität	111
27. Einphasiger Kurzschluß und primäre Sternschaltung ohne Nulleiter	115
28. Einphasiger Kurzschluß und primäre Sternschaltung mit Nulleiter bzw. primäre Dreieckschaltung	118
29. Zweiphasiger Kurzschluß. Das Kurzschlußgebiet des Transformators	123
 III. Der über die Transformator клемmen hinausgreifende Kurzschluß. Allgemeines	 128
30. Der Kurzschluß im Sekundärnetz. Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Kurzschlußarten	128
31. Die Schwächung des Kurzschlusses von der Primärseite her	131
32. Ungeklärte Fragen der Kurzschlußtheorie des Transformators.....	134

Literaturnachweise

(Die im Text mit L. 1, L. 2 usw. bezeichneten Nachweise entsprechen nachfolgenden Büchern und Aufsätzen)

Bezeichnung	Verfasser	Titel, Verlag und Erscheinungsort
L. 1	Vidmar	„Die Transformatoren“, 2. Aufl. Berlin, Jul. Springer, 1925.
L. 2	Vidmar	„Der kupferarme Transformator.“ Berlin, Jul. Springer, 1935.
L. 3	Vidmar	„Das Altern der Transformatoren.“ Wien, E. und M., 1939.
L. 4	Vidmar	„Der Transformator im Betrieb.“ Berlin, Jul. Springer, 1927.
L. 5	Prinz	„Thermisches Verhalten von Öltransformatoren bei Klemmenkurzschlüssen“, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern, Berlin, Bd. XVII, S. 37.
L. 6	Küchler	„Thermische Kurzschlußbeanspruchungen von Transformatoren“, Hochspannungsforschung und Hochspannungspraxis, herausgegeben von J. Biermanns u. O. Mayr. Berlin, Jul. Springer, 1931.
L. 7	Petroff	„Transformatori“, Bd. I, Moskva 1936.
L. 8	Ollendorf	„Studien über das Jochfeld von Transformatoren“, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern, Bd. VII, Berlin 1928.
L. 9	Vidmar	„Der einphasige, zusätzliche Kraftfluß des dreiphasigen Transformators.“ Wien, E. und M., 1927.

Einleitung

1. Physikalische und technische Probleme

Wenn es wahr ist, daß das Gefühl des Staunens — schon Plato und Aristoteles haben es behauptet — der Anfang aller Philosophie ist, so hätten wir Techniker viel mehr Anlaß, in philosophische, zum mindesten in naturphilosophische Grübeleien zu versinken als die Physiker und die Zunftphilosophen. Der zünftige Naturphilosoph kann nur mitstaunen, die Ergebnisse der Naturerforschung hat er, wenn er sie überhaupt beachtet, aus zweiter Hand. Der Physiker staunt selbst. Immer wieder überrascht ihn die Natur mit neuen Gesetzmäßigkeiten, die sich in knappe mathematische Ausdrücke kleiden lassen. Der Techniker staunt mit dem Physiker zusammen. Er hat indessen das Glück, bereits gut bekannte Naturgesetze noch einmal selbst bestaunen zu dürfen, dann nämlich, wenn sie in seinen Wirkungskreis eintreten. Die Überraschung beim Entdecken einer neuen Naturgesetzmäßigkeit ist eben ein ganz anderes Erlebnis als die Überraschung, die das erste praktisch-technische Anwenden eines bekannten Naturgesetzes fast ausnahmslos mit sich bringt. Der Techniker staunt mit und staunt auch selbst.

Nehmen wir z. B. das Joulesche Gesetz. Vom englischen Physiker James Joule im Jahre 1841 experimentell gefunden, beschreibt es in knapper, aber ungemein verlässlicher Form die Wärmemenge, die beim Stromdurchgang durch einen elektrischen Leiter entwickelt wird. Es ist staunenswert, wie einfach sich der Energieumsatz des gewiß ungemein verwickelten Vorganges der Elektronenströmung in Leitern rechnerisch beherrschen läßt. Für den Physiker war das Problem der Stromwärmemenge um die Mitte des vorigen Jahrhunderts erledigt. War es auch für den Starkstromtechniker erledigt, als er im Jahre 1885 Transformatoren zu bauen begann?

Der Techniker staunte nie darüber, daß sich der stromdurchflossene Leiter erwärmt, denn die Stromwärmeerscheinung war ihm natürlich bekannt. Die Technik ist angewandte Physik. Der Techniker staunt nur immer wieder, daß sich sein, vom elektrischen Strom

durchflossener Leiter so erwärmt. Wie? Nun ja, in störender, in unangenehmer Weise.

Der Physiker zerlegt das Naturgetriebe in zahllose Erscheinungsarten und zwingt jede Erscheinungsart unter das Joch eines besonderen „Naturgesetzes“. Deshalb ist ihm die Form des Naturgesetzes alles und dessen jeweiliger Ertrag nichts. Der Techniker baut Getriebe, die von einigen ausgewählten Naturgesetzen belebt werden, er setzt zusammen. Er hat es nie mit einem vereinzelt Naturgesetz zu tun. Deshalb sind ihm die jeweiligen gleichzeitigen Erträge der zur künstlichen Arbeitsleistung eingespannten Gesetze außerordentlich wichtig.

Der Physiker erlebt staunend die Form des Naturgesetzes und der Techniker staunt mit, wenn er das gefundene Gesetz kennenlernt, um es für seine Zwecke zur Verfügung zu haben. Der Techniker muß indessen den Ertrag des angewendeten Naturgesetzes selbständig, staunend, unliebsam überrascht, erleben. Das ist sein Schicksal. Es ist sein Glück, weil er ein Kämpfer ist.

Es ist wahr, daß die Idee einer technischen Einrichtung sehr oft nur ein einziges Naturgesetz dem Menschen dienstbar machen will. So ist z. B. die Idee des Transformators eigentlich nur auf dem merkwürdigen Gesetz der elektromagnetischen Induktion aufgebaut. Die praktische Verwirklichung einer einfachen technischen Idee löst indessen ausnahmslos die Mitwirkung von weiteren, für die Idee unnötigen und deshalb störenden Naturgesetzen aus. Sie sind es, die dann mit ihren Erträgen überraschen und schwere technische Probleme aufstellen.

Der Physiker drängt auf Vereinzelung der Naturgesetze, er sieht und genießt deren selbständigen, absoluten Inhalt. Der Techniker hat immer mit Gruppen von Naturgesetzen zu tun und muß deshalb deren aufeinander bezogene Inhalte überwachen, deren gleichzeitig auftretende Erträge ordnen. Es gibt eine Harmonie im physikalischen Spiel der technischen Einrichtungen, und es gibt gleichsam von der Physik angefertigte Instrumente, aus denen die Technik ihre Orchester zusammensetzt.

So kam es, daß man im Transformatorenbau das großartige Induktionsgesetz, das doch dem Transformator das Leben gab, kaum beachtete, das Stromwärmegesetz jedoch, das sich beim Verwenden metallischer Leiter für die Wicklungen meldete, sofort außerordentlich wichtig fand. Es war eben sehr schwer, das Stromwärmegesetz mit

den Gesetzen der Wärmeabfuhr, die beim Bau des Transformators ebenfalls mitwirken, in Einklang zu bringen.

So kam es, daß der Ertrag der Wicklungsstromwärme des Transformators ein großes technisches Problem wurde, ein Problem, das Jahrzehnte hindurch auf dem jungen Transformatorenbau wie eine schwere Bürde lag, ein Problem, das eigentlich auch heute, nach einem halben Jahrhundert schwerer Kämpfe, immer noch nicht restlos erledigt ist.

Sind denn die technischen Probleme überhaupt lösbar? Muß denn nicht immer wieder von neuem gerechnet werden? Ist z. B. das Stromwärmeproblem des Transformators nicht ein lebendiges, ewig fließendes Problem, das für jeden neuen Transformator sein neues Fragezeichen aufrichtet?

Wenn der jeweilige Ertrag der angewendeten Naturgesetze das letzte Ziel des technischen Problems bliebe, wäre das Problem selbstverständlich ewig offen und unlösbar: Jedes Naturgesetz hat eben eine unübersehbare Menge von Erträgen. Deshalb muß jede neue technische Einrichtung neu berechnet werden. Trotzdem werden die technischen Probleme lösbar, sobald man sie richtig stellt.

Für die technische Wissenschaft ist nicht der gelegentliche Ertrag eines Naturgesetzes wichtig, sondern die bleibenden Verhältnisse der Erträge gleichzeitig angewendeter Naturgesetze. Die sekundliche Stromwärmemenge eines voll belasteten Transformators ist der Theorie des Transformatorenbaus unwichtig. Sehr wichtig dagegen ist das Verhältnis der in 1 Sekunde entstehenden Wicklungsstromwärmemenge zur Größe der kühlenden Wicklungsoberfläche und zur Höhe der sich einstellenden Temperaturunterschiede.

Die Ertragsbeziehungen verschiedener Naturgesetze sind das eigentliche Ziel technischer Probleme. Die Frage nach dem absoluten Ertrag eines Naturgesetzes, z. B. des Stromwärmegesetzes, bleibt ewig offen, obwohl sie praktisch unaufhörlich beantwortet werden muß. Die Frage nach der richtigen Größe des bezogenen Ertrages eines Naturgesetzes ist ein für allemal beantwortbar. Das Problem der bezogenen Wicklungsstromwärme des Transformators hätte somit schon längst gelöst sein können.

Daß es immer noch Schwierigkeiten bereitet, liegt daran, daß im Transformator das Stromwärmegesetz viele Beziehungen pflegen muß: zum Leistungsgesetz, zum Kühlungsgesetz, zum Spannungsfallgesetz, auch zum Herstellungskostengesetz, zum Gesetz der

kleinsten Transformationskosten, sogar zum Überstromabschaltgesetz. Es handelt sich also nicht nur um Beziehungen zu anderen physikalischen Gesetzen: Wirtschaftliche Gesetze und Betriebsgesetze wollen ebenfalls berücksichtigt werden.

Es ist ein umfangreiches Orchester, das im Transformator spielt. Das Stromwärmegesetz war darin sehr lange die erste Geige. Es übertönte jahrzehntelang die zahlreichen anderen physikalischen, wirtschaftlichen und betriebstechnischen Gesetze.

Heute weiß man, wieviel Stromwärme man einem Quadratdezimeter der Wicklungsfläche in der Sekunde zumuten kann. Man weiß, wieviel Wärmewatt man in einem Kilogramm Wicklungskupfer entstehen lassen darf. Man kennt heute den zulässigen Anteil der jährlichen Stromwärmekosten im Ausweis der jährlichen Gesamttransformationskosten.

Noch fürchtet man indessen die Stromwärme des Kurzschlusses. Noch immer tröstet man sich mit der kurzen Dauer des im beweglichen Transformatorbetrieb in allen möglichen Formen zu erwartenden Kurzschlußstroms. Offenbar hat hier das Stromwärmeproblem des Transformators noch ein Loch.

Auf die Dauer ist es jedoch unmöglich, während der kurzen Kurzschlußsekunden einfach nur die Augen zu schließen. Will man endlich mit dem gut 50 Jahre alten Stromwärmeproblem des Transformators fertig werden, so muß man vor allem unerschrocken zusehen, wie sich im Kurzschluß die Stromwärme entwickelt. Dies führt zur Frage, wie groß der Kurzschlußstrom des Transformators in den möglichen Betriebsfällen werden kann.

2. Belastungserwärmung des Wicklungskupfers

Man kann sich leicht die Überraschung vorstellen, die die erste Belastungsprobe des ersten Transformators brachte. Die Verwirklichung der Transformationsidee, sofort erkennbar, einen kurzen Augenblick beglückend, glitt bei dieser Probe langsam in einen beunruhigenden Schatten: Der arbeitende Transformator fing an, sich zu erwärmen.

Vor dem ersten Transformator gab es schon umlaufende elektrische Maschinen. Sie erwärmten sich im Betrieb. Daß sich der Transformator auch erwärmte, war somit nicht überraschend. Wie er sich erwärmt, war dagegen eine beängstigende Frage. Die Antwort

wollte erlebt werden. Sie wurde umfangreicher als man ahnen konnte. Deshalb zog sie sich durch lange Jahrzehnte schwerer technischer Arbeit hindurch.

Aus mehreren Gründen war die Arbeitswärme des Eisenkerns dem Transformatorenbau von allem Anfang an die weniger wichtige Überraschung als die Arbeitswärme der Wicklungen. Sie war vor allem weniger gefährlich. Der Eisenkern brauchte wenig oder keine empfindlichen und lebenswichtigen Isolierstoffe, die von der Wärme bedroht werden konnten. Sodann war die Eisenkernwärme eine beständige Erscheinung, weil bei Spannungstransformatoren der magnetische Kraftfluß von der Belastungshöhe fast unabhängig ist. Endlich konnte man hoffen, und wie es sich erwies, mit Recht, daß man durch Veredelung des Kerneisens die Energieverluste der periodischen Ummagnetisierung verkleinern werde.

Die Arbeitswärme der Wicklung, die Stromwärme des Wicklungskupfers, war gewiß eine sehr peinliche Überraschung des jungen Transformatorenbaus. So wie sie auftrat, d. h. empfindlich heizend, war sie sofort eine ernste Gefahr für die die Wicklungsleiter schützenden, unentbehrlichen Isolierstoffe. Man wußte, daß sie in hohem Maße von der Höhe der Belastung abhängig ist: das Joulesche Gesetz war ja längst bekannt. Daß sie sofort eine Belastungsgrenze zu ziehen drohte, war sehr unangenehm. Wie sie diese Grenze ziehen werde, wurde eine wichtige, ernste Frage. Dabei war keine Hoffnung vorhanden, ihren Druck auf die Transformation durch Veredelung des Wicklungsmetalls zu verkleinern. Das verwendete Kupfer war ohnehin elektrisch unübertrefflich edel.

Als sich nun bei der Belastungsprobe des ersten Transformators sowohl der Eisenkern als auch die Wicklung zu erwärmen begannen, war es gewiß eine Qual, dem verhältnismäßig langsamen Temperaturanstieg folgen zu müssen. Von Minute zu Minute war wenig Unterschied zu sehen, von Viertelstunde zu Viertelstunde dagegen konnte man das Steigen der Quecksilbersäule des Fieberthermometers deutlich feststellen.

Mußte dabei nicht die beängstigende Frage entstehen, wie lange der Temperaturanstieg dauern, ob er überhaupt ein Ende finden werde und wo der Erwärmungsvorgang schließlich ausklingen müsse? Es dauerte lange Stunden, bis eine Antwort vorlag, die erste, die gewiß nur für einen besonderen Fall gültige Antwort. Es dauerte Jahrzehnte, bis eine allgemein gültige Antwort erkämpft wurde.

Heute wissen wir, wie die Temperatur im Wicklungskupfer vom Belastungsanfang an steigt, wie lange sie steigt, wo sie schließlich stehenbleibt. Heute ist die Überraschung der Arbeitswärmeerscheinung überwunden — bis auf einen kleinen Rest, den Kurzschlußrest. Es ist nicht überflüssig, in kurzen, groben Zügen aufzuzeichnen, was wir festgestellt haben.

Das Bild, das wir entwerfen wollen, braucht die Erwärmung des Eisenkerns des Transformators nicht zu berücksichtigen. Der Erwärmung der Wicklung ausschließlich nachgehend, kann es von der Tatsache ausgehen, daß das Joulesche Stromwärmegesetz auch seine technische Form hat. Der Umstand, daß der Wicklungsleiter auf seinem sich um den Eisenkern windenden Wege seinen Querschnitt nicht verändert, gestattet den Ersatz des von Joule berücksichtigten Stromstärkenquadrats durch das Stromdichtenquadrat und die Einführung des Leitergewichts.

Bezeichnet man also mit:

V_k = die Wicklungsstromwärme (W),

I = den Wicklungsstrom (A),

R = den Wicklungswiderstand (Ω),

g = die Wicklungsstromdichte (A/mm²) und

k_k = die spezifische Verlustziffer des Wicklungskupfers $\left(\frac{W \cdot \text{mm}^4}{\text{kg} \cdot \text{A}^2}\right)$,

so kann man statt:

$$V_k = I^2 \cdot R \quad \dots \dots \dots (1)$$

(Joule), bekanntlich:

$$V_k = k_k \cdot g^2 \cdot G_k \quad \dots \dots \dots (1a)$$

schreiben.

In genau gleichem Ausmaß wie R ist natürlich auch k_k temperaturabhängig. Beide Größen enthalten den spezifischen Widerstand ϱ , der für Kupfer von ϑ Grad Celsius:

$$\varrho = 0,01754 [1 + (\vartheta - 20) \cdot 0,00388] \frac{\text{Ohm mm}^2}{\text{m}} \quad \dots \quad (2)$$

beträgt.

Es ist:

$$k_k = \frac{\varrho \cdot 10^3}{8,9}, \dots \dots \dots (3)$$

weil das Kupfer je dm³ 8,9 kg wiegt.

Einem Kilogramm Kupfer muß man 390 Wattsekunden Wärme zuführen, damit seine Temperatur um 1°C steigt. Die spezifische Wärme:

$$c_k = 390 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}} \dots \dots \dots (4)$$

ist eine wichtige Größe des Stromwärmeproblems des Transformators. Sie gestattet vor allem die Berechnung der Zeit, die ein Strom von g (A/mm^2) Dichte mindestens braucht, um seinen Kupferleiter um 1°C zu erwärmen:

$$t = \frac{c_k}{k_k \cdot g^2} \text{ Sekunden} \dots \dots \dots (5)$$

Der Wert der Gl. (5) hängt ein wenig von der jeweiligen Kupfer-temperatur und sehr stark von der jeweiligen Stromdichte ab. Bei 45°C erreicht er fast genau die Höhe von 3 Minuten, sofern die Stromdichte $1 \text{ A}/\text{mm}^2$ beträgt, wird kleiner, wenn das Kupfer wärmer, und größer, wenn es kälter wird.

Die ersten Transformatoren hatten niedrige Stromdichten. Noch um die Jahrhundertwende wagte es der Transformatorenbau kaum, wesentlich über $1 \text{ A}/\text{mm}^2$ hinauszugehen. Nach Gl. (5) hätte die Belastungsprobe vor Jahrzehnten einen Temperaturanstieg ergeben müssen, der von Grad zu Grad Celsius einige Minuten verstreichen läßt. Dieselbe Gl. (5) fordert heute, bei Stromdichten von $4 \text{ A}/\text{mm}^2$ und darüber, viel schnellere Erwärmungen, sie stellt kleine Bruchteile von Minuten, etwa 10 Sekunden, Zeitzwischenräume zwischen Grad und Grad in Aussicht.

Warum erwärmt sich und warum erwärmt sich auch heute die Transformatorwicklung viel langsamer als es Gl. (5) erwarten läßt? Warum müssen wir 10, auch mehr Stunden warten, bevor sich das Wicklungskupfer um 70°C erwärmt? Warum bleibt es überhaupt bei einer Grenzerwärmung stehen?

Das Wicklungskupfer ist immer in Isolierstoffe eingehüllt, die eine erheblich größere spezifische Wärme haben und deshalb bei der Aufspeicherung der Stromwärme kräftig mitwirken. Die Leiterhülle vergrößert scheinbar die spezifische Wärme des Kupfers.

In seinen Anfängen war der Transformatorenbau übertrieben vorsichtig und hüllte die Wicklungsleiter gerne unnötig ausgiebig ein. Das Kilogramm Wicklungskupfer brauchte deshalb scheinbar nicht nur 390 Wattsekunden um sich um 1°C zu erwärmen, sondern bedeutend mehr: 500, auch 600 Wattsekunden.

Später, als die Ölkühlung aufkam, wurde die Leiter- und die Leiterspulenhülle dünner und dünner. Trotzdem wuchs die scheinbare spezifische Wärme des Wicklungskupfers gewaltig. Sieht man mit unbefangenen Augen zu, so entdeckt man leicht die Quelle der Zunahme der Wärmeaufnahmefähigkeit. Das Wicklungskupfer des Öltransformators ist eben in eine gewaltige Ölhülle eingewickelt und das Öl hat eine verhältnismäßig große spezifische Wärme. Neuzeitige Öltransformatoren haben, von außen gesehen, je Kilogramm Wicklungskupfer zuweilen 10000 Wattsekunden nötig, bevor sie der Stromwärme 1°C Temperaturanstieg gestatten können. Der Einfluß der großen neuzeitigen Stromdichten wird somit in Gl. (5) durch den Einfluß der vielfach vergrößerten scheinbaren Wärmeaufnahmefähigkeit des Wicklungskupfers neuzeitiger Öltransformatoren aufgewogen.

Wenn es aber heute wie in alten Zeiten wegen der Mitwirkung der Wicklungsleiterhülle einige Minuten, sagen wir 4 Minuten, dauert, bevor die Kupfertemperatur — besser gesagt, die scheinbare Kupfertemperatur — um 1°C größer werden kann, warum ist und war die Gesamterwärmung um 70 oder 60°C nicht in rund 4 Stunden beendet ?

Die Antwort ist leicht: Das Wicklungskupfer speichert nicht die ganze Stromwärme auf. Am Belastungsanfang bleibt wohl die entstehende Stromwärme im Kupfer, weil es noch kein Temperaturgefälle nach außen gibt. Allmählich entsteht jedoch ein nach außen gerichteter Wärmestrom, der, die Wicklungskupferhülle durchbrechend, die Arbeitswärme in die kühle Umgebung des Transformators entführt. Je wärmer das belastete Kupfer wird, um so steiler ist das Wärmestrombett, um so schneller entweicht die Stromwärme aus dem Kupfer. Deshalb steigt die Kupfertemperatur vom Belastungsanfang an erst schnell, dann aber langsamer und langsamer, bis sie überhaupt nicht mehr höher klimmen kann. Wenn einmal die entstehende Stromwärme zur Gänze nach außen abfließt, ist der Erwärmungsvorgang des belasteten Transformators beendet. Daß der Erwärmungsvorgang mit Wärmeabgabe an die Wicklungs-umgebung länger dauert als ohne Wärmeabgabe, ist klar.

3. Wicklungszerlegung in Spulen. Natürliche Luftkühlung

Es ist heute schwer, festzustellen, wie der Glaube an eine Grenztemperatur der Transformatorwicklung, die nur unter Lebensgefahr für die Wicklungsisolierstoffe überschritten werden dürfe, eigentlich

entstanden ist. Zunächst hieß es, die Baumwolle, die im jungen Transformatorenbau den Wicklungsleiter umhüllte, vertrage dauernd bis 110°C , verkohle jedoch und siehe schnell dahin, wenn das Wicklungskupfer noch wärmer wird. Später wurde die 110°C -Grenze für alle in Betracht kommenden Isolierstoffe als unüberschreitbar bezeichnet. Man wies immer wieder auf angeblich verlässliche Erfahrungen hin und verteidigte die 110°C -Regel gerne mit überlegenen Gesten. Vielleicht ist die Grenztemperaturregel nur deshalb so mächtig geworden, daß sie noch heute die Sicherheitsvorschriften beherrscht, weil sie nie wirklich ordentlich begründet wurde.

In Deutschland mußte man damit rechnen, daß an heißen Sommertagen das Wicklungskupfer auch stromlos die Temperatur von 35°C erreichen kann. Man hatte deshalb für die Belastungserwärmung höchstens $110 - 35 = 75^{\circ}\text{C}$ zur Verfügung. Man wußte auch schon früh, daß das Wicklungskupfer des Transformators nicht überall gleich warm wird. In der Nähe der kühlenden Wicklungsoberfläche erwartete man erheblich niedrigere Temperaturen als tief drinnen in der arbeitenden Wicklung. Gezwungen, die Kupfertemperatur auf dem Umwege über Widerstandsmessungen zu überwachen, verurteilt also, die mittlere Kupfertemperatur statt der gefährlichen höchsten im Auge zu behalten, begrenzte man die zulässige Wicklungskupfererwärmung statt mit 75°C entsprechend niedriger. Solange der Trockentransformator die führende Bauart war, erlaubten die deutschen Sicherheitsvorschriften 60°C Kupfererwärmung.

Das war in Ordnung. Man maß an der kühlenden Wicklungsoberfläche etwa 50°C Übertemperatur, wenn die Widerstandsmessung eine mittlere Kupferübertemperatur von 60°C ergab. Man erwartete mit Recht, daß die höchste Kupferübertemperatur die mittlere um ebenso viele Grade überragen wird, wie diese die niedrigste. Im Stromwärmeproblem noch unerfahren, wählte der junge Transformatorenbau einen sicheren Weg.

Als nun später die Ölkühlung aufkam, wurde man kühner. Man sah, daß die starke Spulenhülle des Transformators unnötig wurde, sah gleichsam den heißesten Wicklungskupferpunkt näher an die kühlende Wicklungsoberfläche heranrücken und erlaubte deshalb eine mittlere Wicklungskupfererwärmung von 70°C . Trotzdem blieben für den Wärmeübertritt von der eigentlichen Kühlungs- oberfläche, von der Ölkastenwand, in die Umgebungsluft nur etwa

50° C treibenden Temperaturunterschiedes übrig. Aus der Wicklungsoberfläche tritt ja die Stromwärme zunächst ins Öl über, um dann vom Öl der Kastenoberfläche zugeführt zu werden. Der Wärmeübertritt ins Öl braucht aber auch seinen treibenden Temperaturunterschied.

Wie ist nun der sich entwickelnde Transformatorenbau mit den 50° C ausgekommen, die ihm die Stromwärme von der Wicklung in die Umgebungsluft zu treiben bereit waren? Um diese interessante Frage klar beantworten zu können, wählen wir einen scheinbar umständlichen Weg.

Wir denken uns eine Kupferkugel, die ein Kilogramm wiegt. Sie hat, wie eine einfache Rechnung zeigt, einen Durchmesser von 0,6 dm. Sie hat somit eine Oberfläche von 1,131 dm². Auf die mittlere Temperatur von $35 + 60 = 95^{\circ}\text{C}$, die dem Trockentransformatorkupfer erlaubt ist, erwärmt, würde das Kugelkupfer bei der Stromdichte von 1 A/mm² nach den beiden Gleichungen (2) und (3) eine Stromwärme von 2,55 Watt entwickeln. Die Kugeloberfläche hätte somit im Dauerbetrieb je Quadratdezimeter 2,25 Watt in die Umgebung abzuführen.

Kann man diese Wärmestromstärke bei natürlicher Luftkühlung mit dem treibenden Temperaturunterschied von 50° C bewältigen? Sicherlich. Die Wärmestrahlung allein ist bei 50° C Übertemperatur 3,0 Watt/dm² gut gewachsen (L. 1, S. 295). Durch Wärmemitnahme kann man weitere 3,0 Watt/dm² gut herausziehen (L. 1, S. 315). Die untersuchte Kupferkugel könnte demnach sogar eine Stromdichte von 1,65 A/mm² ertragen, ohne sich an ihrer Oberfläche um mehr als 50° C zu erwärmen.

Das beachtenswerte Ergebnis der einfachen Rechnung ist geeignet, zur Geringschätzung der Schwierigkeiten, die der junge Transformatorenbau zu überwinden hatte, zu verführen. Deshalb muß es ausgebaut werden. Es gibt eine Menge von Richtungen, die für diesen Ausbau in Betracht kommen.

Vor allem darf man nicht übersehen, daß eine kleine Kupferkugel viel leichter mit ihrer Stromwärme fertig wird als eine große. Das Kugelgewicht wächst mit der dritten, die Kugeloberfläche nur mit der zweiten Potenz des Durchmessers. Eine 8 kg wiegende Kupferkugel hätte bei der Stromdichte von 1 A/mm² bereits 4,5 Watt/dm² abzuführen. Während wir der kleinen Kugel, die nur 1 kg wog, 1,65 A/mm² aufbürden konnten, müssen wir uns bei 8 kg Kugel-

gewicht mit $1,17 \text{ A/mm}^2$ zufrieden geben, wenn wir mit einer Oberflächenübertemperatur von 50°C auskommen wollen.

Die Transformatorenwicklungen sind nun weit schwerer als die betrachteten Kupferkugeln, sie sind um so schwerer, je größer der Transformator ist. Großtransformatoren brauchen Tausende Kilogramm Kupfer. Ihr Kühlungsproblem droht offenbar, sich verhängnisvoll zu verwickeln. Man darf ja nicht vergessen, daß man nie mit 1 A/mm^2 Stromdichte zufrieden war, daß man höher und höher strebte, daß man bei Trockentransformatoren schließlich 2 A/mm^2 erreichte und bei Öltransformatoren auch 4 und mehr A/mm^2 haben wollte und erkämpfte. Wie waren eigentlich diese Kühlungserfolge möglich ?

Der Druck des Kupfergewichts zwang früh zur Zerlegung der Wicklung. Der dreiphasige Transformator hat einen dreisäuligen Eisenkern und braucht drei Phasenwicklungen. Die sich so ergebende erste, natürliche Zerlegung des Gesamtwicklungskupfers wurde eigentlich nie als eine wertvolle Kühlungsmaßregel erkannt. Auch die weitere, natürliche Scheidung der primären Wicklungshälfte von der sekundären ergab sich von selbst, bevor man an die Wärmeabfuhrprobleme zu denken begann. Der eigentliche Eingriff des Stromwärmeproblems hatte seit jeher tiefere Ziele. Jede Phasenwicklungshälfte muß in Spulen zerlegt werden. Je größer der Transformator, um so größer mußte die Spulenzahl primär und sekundär werden.

Alte Trockentransformatoren bevorzugten die Scheibenspulenwicklungsanordnung. Die Zerlegung ihrer Phasenwicklungshälften in Spulen war nur scheinbar eine Maßregel gegen zu große induktive Spannungsabfälle. Als später die Zylinderwicklungen aufkamen, mußte die Wicklungszerlegung doch beibehalten werden, obwohl sie auf den induktiven Spannungsabfall fast gar keinen Einfluß hatte.

Es hilft nichts, das Stromwärmeproblem gestattet nur einige wenige Kilogramm wiegende selbständige Kupferkörper als Wicklungsteile. Selbst sehr große Transformatoren haben Spulen, die kaum 10 kg Kupfer enthalten. Deshalb sind ihre Phasenwicklungshälften ungemain stark unterteilt.

Das oben beschriebene Kühlungsoffer, das sich beim Übergang von der nur 1 kg schweren Kupferkugel zur achtmal schwereren ergibt, muß meist gebracht werden. Darüber hinaus geht man ungerne. Je größer der Transformator, um so schwerer ist es allerdings,

genügend leichte Spulen zu erhalten. Man unterteilt indessen die Großtransformatorenwicklungen so stark man kann.

Die Zerlegung der Wicklungen in Spulen schützt den Transformator vor den Folgen des ungleichartigen Wachstums der Gewichte und der Oberflächen. Es fordert jedoch ein schweres Opfer. Es entwertet die Wärmestrahlung neben der Wärmemitnahme. Nur bei einer allseitig freien Kupferkugel ist die Wärmestrahlung ungefähr der Wärmemitnahme ebenbürtig.

Jede Oberfläche strahlt nur insofern, wie sie sichtbar ist (L. 1, S. 298). Eine gewellte Oberfläche nach Abb. 1 gilt für die Wärmemitnahme voll, für die Wärmestrahlung jedoch nur soviel wie ihre Projektion in die zu der Hauptstrahlungsrichtung senk-

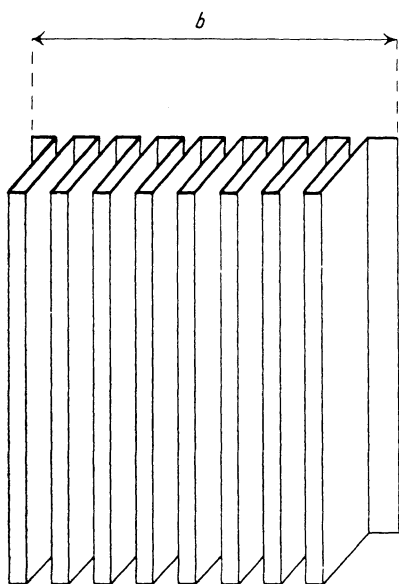


Abb. 1

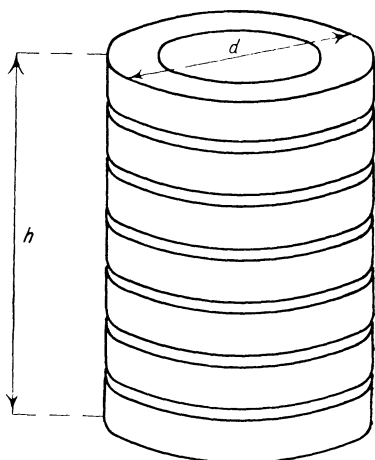


Abb. 2

recht gelegte Ebene. Ursprünglich ungefähr gleich ergiebig wie die Wärmemitnahme, leistet also die Wärmestrahlung an einer nach Abb. 1 gewellten Oberfläche in demselben Verhältnis weniger, in dem die Flächenbreite b (Abb. 1) kleiner ist als die Länge der gewellten Linie des Profils.

Ein in Spulen zerlegter Wicklungszyylinder (Abb. 2) strahlt nur mit seiner äußeren einfachen Zylinderoberfläche, $d h \pi$, der Wärmemitnahme bietet er jedoch außerdem alle, verhältnismäßig großen

Spulenseitenflächen und auch die innere, der eisernen Säule zugekehrte Zylinderoberfläche. Aber selbst die einfache äußere Zylinderoberfläche einer Säulenwicklung wird der Strahlung durch die benachbarten Säulenwicklungen stark entwertet.

Es ist klar: Je stärker eine Wicklung in Spulen zerlegt wird, um so mehr tritt die Wärmestrahlung zurück. Kann man bei einer allseitig freien Kugel bei 50° C Oberflächenübertemperatur gut 3 W/dm² Wärmeabgabe durch Mitnahme und ebensoviel durch Strahlung erwarten, so sinkt die Gesamtwärmeabgabe bei demselben treibenden Temperaturunterschied bei stärkerer und stärkerer Wicklungsunterteilung allmählich auf 3 + 2, dann auf 3 + 1, schließlich auf 3 + 0,5 W/dm² und noch tiefer zurück. Im Ölbad spielt die Wärmestrahlung der Wicklungsoberfläche keine Rolle. Auf der Ölkastenoberfläche erlebt sie ungefähr dasselbe Schicksal wie auf der Wicklungsoberfläche der Trockentransformatoren.

Man entdeckt unschwer, daß die Wicklungsunterteilung in Spulen lediglich für die Wärmemitnahme ihre oben beschriebene Bedeutung haben kann. Für die Wärmestrahlung ist der Wicklungskörper unzerlegbar, ununterteilbar. Der Druck des mit der Leistung wachsenden Wicklungskupfergewichts trifft die Wärmestrahlung wehrlos. Sie ist deshalb um so weniger beachtenswert, je größer der Transformator ist.

Bleibt es dabei, daß die Transformatorspulen immer, bei halbwegs nennenswerten Leistungen, nur einige wenige Kilogramm wiegen und daß die Wärmestrahlung stark hinter der Wärmemitnahme zurückbleibt, so scheint es, daß Trockentransformatoren kaum höhere Stromdichten erreichen können als 1 A/mm². Sie sind, wie man weiß, viel höher geklommen. Wie war das möglich?

Die Wicklungsspulen sind alles, nur keine Kugeln. Das Rechnungsbeispiel, von dem wir ausgegangen sind, setzte eine kupferne Kugel von 1 kg Gewicht voraus. Es wählte bewußt einen sehr ungünstigen Fall: Bei gleichem Rauminhalt hat die Kugel als Kupferkörper die kleinste Oberfläche. Das Stromwärmeproblem hat offenbar geometrische Hilfsmittel zur Verfügung.

Der Weg von der Kugel zu einem sehr in die Länge gezogenen Parallelepipet braucht gar nicht erst gesucht zu werden: Der Transformator erzwingt ihn, denn seine Spulen müssen die Eisenkernsäulen umwinden. Sie können dem rechteckigen Querschnitt nicht ausweichen. Die Seitenlängen des Spulenquerschnittsrechtecks und

die mittlere Windungslänge sind die drei Seitenlängen des Spulenparalleloipeds.

Versuchen wir es mit einem quadratischen Spulenquerschnitt, um einen ganz einfachen Weg zu betreten, und nehmen wir an, daß die mittlere Windungslänge 20mal größer ist als die Seiten des Spulenquerschnittsquadrats, so bekommen wir bei 1 kg Spulengewicht die Abmessungen $17,8 \times 17,8 \times 356 \text{ mm}^3$. Die Oberfläche der Spule erreicht $2,56 \text{ dm}^2$, sie ist 2,25mal größer als die Oberfläche einer gleich schweren Kugelspule. Die zulässige Stromdichte ist deshalb diesmal $\sqrt{2,25} = 1,5$ mal höher als im Kugelfalle.

Einen weiteren wichtigen Beitrag gibt die Leiter- und Spulenhülle. Zuweilen füllt das Kupfer nur 40% des Spulenquerschnitts aus, den größeren Rest besetzt dann der Isolierstoff, der natürlich in dem für die Stromwärme maßgebenden Kupfergewicht der Spule nicht zum Ausdruck kommt, wohl aber die kühlende Spulenoberfläche vergrößert.

In dem soeben durchgerechneten Spulenbeispiel würde der Kupferfüllfaktor 0,4 die Spulenabmessungen auf $28 \times 28 \times 356 \text{ mm}^3$ vergrößern und für die Kühlung rund $4,0 \text{ dm}^2$ bereitstellen. Die wirkliche, mit dem notwendigen Isolierstoff ausgestattete Spule erreicht so bei gleichem Kupfergewicht fast die vierfache Oberfläche einer unisolierten Kupferkugel.

Der Isolierstoff ist indessen nur scheinbar ein sehr ausgiebiger Helfer im Kampf mit der Stromstärke des Wicklungskupfers. Er erschwert natürlich die Wärmebewegung aus dem Spuleninnern zur kühlenden Oberfläche. Die Kupferkugel ist in ihrem Innersten nur unmerklich wärmer als an ihrer Oberfläche, die wirkliche Spule braucht einen beachtenswerten Temperaturunterschied für den inneren Teil ihres Wärmestroms. Nur deshalb darf sie sich ja an ihrer Oberfläche nur um 50° C erwärmen.

Das Beispiel der isolierten, 1 kg Kupfer enthaltenden Spule ist sehr belehrend. Es zeigt, daß eine 8 kg Kupfer enthaltende Spule gleicher Gestalt die Abmessungen $56 \times 56 \times 712 \text{ mm}^3$ haben würde. Würde man sich wundern, bei einem Scheibenspulentrockentransformator solche Spulenabmessungen anzutreffen, wenn es sich um etwa 120 kVA Leistung handeln würde?

Man sieht, daß es möglich ist, bei Trockentransformatoren in die Nähe von 2 A/mm^2 Stromdichte vorzudringen. Höher kommt man bei 50° C Spulenoberflächenübertemperatur schwer. In der Tat ist man mit natürlicher Luftkühlung nicht höher gekommen.

4. Natürliche Ölkühlung. Künstliche Kühlung

Der Übergang von der natürlichen Luft- zur natürlichen Ölkühlung war ein gewaltiger Schritt auf dem Entwicklungsweg des Transformatorenbaus. Scheinbar nur von den Spannungsproblemen erzwungen, brachte er eine Teillösung des Stromwärmeproblems von unerhörter Durchschlagkraft. Wir sind vielleicht erst jetzt imstande, die wirkliche Bedeutung der Ölkühlung im klaren Licht zu sehen.

Die Wicklungsspulen des Trockentransformators mußten in starke isolierende Hüllen eingewickelt werden. Diese Hüllen erschwerten den Stromwärmeabfluß aus dem Spulennern, sie erschwerten den Kampf mit der Stromwärme.

Steckt man die Spule in eine kräftige Ölhülle, statt sie mit isolierenden Bändern zu umwickeln, so erleichtert man die Wärmeabfuhr nach zwei Richtungen. Das Öl kühlt statt als Isolierstoff die Kühlung zu drosseln. Es kann deshalb so ausgiebig als Isolierstoff aufgetragen werden, daß es die kühlende Wicklungsoberfläche in ungeahntem Ausmaße vergrößert. Ja, es löst die Gestaltung der Wicklungsoberfläche ganz vom Wicklungskupfergewicht.

Die Ölkastenoberfläche ist ihrem Wesen nach immer noch die Oberfläche einer mit Isolierstoffen ausgestatteten Wicklung. Sie ist indessen außerordentlich beweglich, außerordentlich ausgestaltbar. Sie war wohl in ihren Anfängen glatt, bekam später kleine Wellen, noch später tiefe Wellen. In Amerika entstanden vor zwei Jahrzehnten die bekannten Röhren- und Radiatorenkasten (L. 1, S. 523). Kurz, die Ölkühlung erlaubte eine fast mühelose Beschaffung der bei 50° C Oberflächenübertemperatur benötigten, die Wärme an die kühlende Umgebungsluft abgebenden dm².

Daß bei der allmählichen Ausgestaltung der Ölkastenoberfläche die Wärmeabgabe durch Strahlung mehr und mehr entwertet wurde — für die Wärmestrahlung war und blieb die Kastenoberfläche glatt, eben — ist klar. Deshalb darf 1 dm² Kastenoberfläche nur wenig mehr als 3 Watt übernehmen, wenn es mit 50° C auskommen will. Die Wärmemitnahme durch die kühlende Luft ist fast alles, womit es rechnen darf.

Die eigentliche Wicklungsoberfläche des Öltransformators ist indessen doch noch zum Teil im Bereich des Stromwärmeproblems geblieben. Das Öl entnimmt ihr die Stromwärme, schleppt sie zur inneren Kastenwand, ladet sie dort ab und kehrt zur warmen Wick-

lung zurück. Es macht dasselbe an der Wicklungsoberfläche, im Transformatorinnern, was die Umgebungsluft draußen macht. Die Luft entnimmt ja der Kastenoberfläche die Arbeitswärme des Transformators, schleppt sie irgendwohin, ladet sie an kühlere Körper in der Umgebung des Transformators ab und kehrt zum warmen Kasten zurück.

Der Öltransformator hat zwei hintereinander geschaltete Kühlungsvorgänge, der Trockentransformator nur einen einzigen. Der Öltransformator braucht deshalb neben dem Temperaturunterschied von 50°C , der ihm an der Kastenoberfläche ebenso arbeitet wie seinerzeit dem Trockentransformator an der Wicklungsoberfläche, noch einen zweiten Temperaturunterschied, der von seiner Wicklungsoberfläche die Wärme ins Öl treibt.

Die Wärmemitnahme des Ölbad es ist weitaus ergiebiger als die Wärmemitnahme des Luftbades (L. 1, S. 318). Man kann wohl mit einem Verhältnis 10 : 1 rechnen. Das Öl nähme demnach bei 50°C treibenden Temperaturunterschiedes gut 30 W/dm^2 mit. Es ist bekannt, daß die Ergiebigkeit der Wärmemitnahme schneller abnimmt als der treibende Temperaturunterschied. Stehen z. B. nur 20°C zur Verfügung, so darf man im Öl wohl nur etwa 10 W/dm^2 Wärmeentzug erwarten.

Es wäre gewiß ein gewaltiger Erfolg des Kühlungsproblems, an der Ölkastenoberfläche nur rund ein Drittel jener Wärmestromdichte ertragen zu müssen, die sich auf der Wicklungsoberfläche einstellt. Griff e man nach ihm, so hätte man an der äußeren Kastenoberfläche rund 3 W/dm^2 , die man mit 50°C bewältigen kann, an der Wicklungsoberfläche dagegen etwa 10 W/dm^2 , für die man 20°C braucht.

Nur scheinbar ist dem Transformatorenbau dieser Erfolg unerreichtbar, weil $50 + 20 = 70^{\circ}\text{C}$ bereits jenen treibenden Gesamttemperaturunterschied darstellen, der von der kalten Umgebungsluft bis zum mittelwarmen Kupfer, also über die Wicklungsoberfläche hinaus, reichen muß. In Wirklichkeit sind, glücklicherweise, die beiden treibenden Temperaturunterschiede des Öles und der Luft im Öltransformator nicht rein hintereinander geschaltet. Sie überlappen einander, etwa so wie in Abb. 3 dargestellt.

Das kühlende Öl steigt an der heißen Wicklungsoberfläche in einer dünnen Schicht empor und füllt sich mit Wärme (L. 1, S. 310). Die Schicht hat an ihrer der Wicklung zugekehrten Seite die Temperatur der Wicklungsoberfläche, außen dagegen die Temperatur des

kalten Öles. Das treibende Temperaturgefälle hat überall in der kühlenden Ölschicht dieselbe Größe, weil jedes Quadratdezimeter der Wicklungsoberfläche ungefähr dieselbe Wärmemenge abführen muß. Deshalb muß die Wicklungsoberflächentemperatur nach oben zunehmen, es muß aber auch die Stärke des ins Öl eingedrungenen Wärmekeils nach demselben Gesetz von unten nach oben größer werden (Abb. 4).

Verläßt schließlich das kühlende Öl oben die Wicklungsoberfläche, um noch höher zu steigen, so braucht es seine

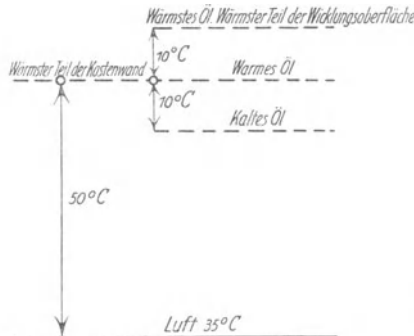


Abb. 3

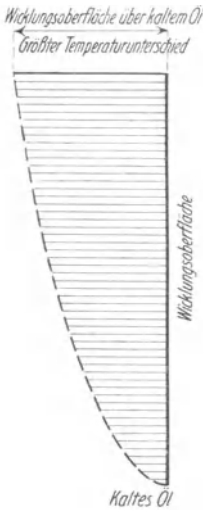


Abb. 4

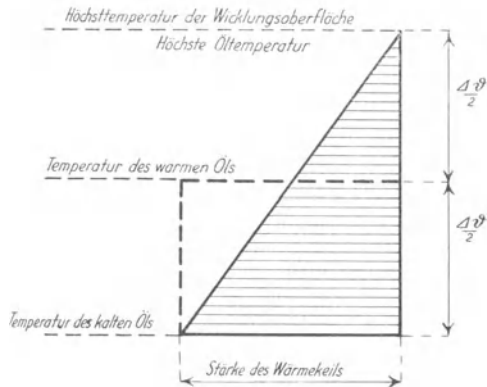


Abb. 5

frühere Temperaturverteilung nicht mehr. Die Temperatur des sich oben unter dem Kastendeckel sammelnden warmen Öles liegt demnach (Abb. 5) in der Mitte zwischen der Höchsttemperatur der Wicklungsoberfläche und der Temperatur des kalten Öles. Der Kastenwand zuströmend, um sich an ihr abzukühlen, setzt das warme Öl offenbar nur den halben der Ölwärmemitteln dienenden Temperaturunter-

schied auf den an der äußeren Kastenwand wirkenden Temperatursprung auf, um die höchste Wicklungsoberflächentemperatur zu erreichen. So ergibt sich gemäß Abb. 3 eine Wicklungsoberflächentemperatur von $50 + \frac{20}{2} = 60^\circ \text{C}$, mit der der Öltransformator rechnen darf, ohne die erlaubte mittlere Kupferübertemperatur von 70°C zu überschreiten.

Das entworfenene, allerdings nur mit rohen Zügen gezeichnete Bild der Kühlungswirtschaft eines Öltransformators, ist sehr belehrend. Es zeigt, daß die Wicklungsoberfläche unter Öl einen dreimal dichteren Wärmestrom als im Luftbad bequem verträgt. Es läßt schließen, daß Öltransformatoren $\sqrt{3}$ mal höhere Stromdichten leicht vertragen als Trockentransformatoren.

In der Tat erreichte man mit der Ölkühlung dort ohne Schwierigkeiten $3,5 \text{ A/mm}^2$, wo man mit der Luftkühlung bei 2 A/mm^2 stecken blieb. Zuweilen verdichtete man sogar den Wärmestrom an der ölgekühlten Wicklungsoberfläche über 10 W/dm^2 hinaus. Über 15 W/dm^2 ging man allerdings nicht gern. Deshalb sind für Öltransformatoren mit natürlicher Kühlung 4 A/mm^2 eine Art Grenzstromdichte geworden.

Die Wärmemitnahme ist bekanntlich mit der Geschwindigkeit der an der heißen Oberfläche dahinströmenden Flüssigkeit eng verbunden (L. 1, S. 310). Die wärmemitnehmende Luft erreicht aus eigener Kraft Geschwindigkeiten bis etwa 1 m/sec . Das wärmemitnehmende Öl ist viel träger. Es kann 1 cm/sec zurücklegen, wenn es auf sich allein angewiesen ist.

Man kann nun mit künstlichen Mitteln, durch Anblasen der Kastenwand, durch einen mit Hilfe einer außerhalb des Kastens wirkenden Ölpumpe erzeugten Ölkreislauf, die Wärmemitnahme erheblich beleben. Sie wird mit der Quadratwurzel aus der Kühlstromgeschwindigkeit ergiebiger.

Die künstliche Kühlung durchbricht bei nicht zu großen Leistungen leicht die der natürlichen Kühlung gesetzten Grenzen. Man kommt, wie leicht ersichtlich, auch ohne Öl auf 3 bis 4 A/mm^2 im Wicklungskupfer, wenn man einen entsprechend kräftigen Lüfter zu Hilfe nimmt. Man erreicht, wenn man will, mit künstlicher Ölkühlung 5 bis 6 A/mm^2 , auch mehr.

Ganz große Leistungen müssen allerdings zur künstlichen Kühlung greifen, wenn sie die Stromdichte dort erhalten wollen, wohin sie sich

bei kleineren Leistungen hinaufgerungen hat. Das Gesamtgewicht des Wicklungskupfers wird bei andauernd wachsender Leistung schließlich doch zu mächtig. Es läßt sich dann doch nicht mehr ausreichend zerlegen. Ganz große Transformatorenspulen werden eben doch schwer.

5. Grenzstromdichten des Transformatorbaus. Wirtschaftlichste Leistung

Der Trockentransformator mußte vor dem Öltransformator das Feld räumen; nicht etwa deswegen, weil er bei einer Stromdichte von etwa 2 A/mm^2 steckengeblieben ist, sondern weil er bei den unaufhörlich wachsenden Betriebsspannungen der sich mächtig entwickelnden Starkstromtechnik nicht mehr verlässlich genug arbeiten konnte. Der Übergang von der natürlichen Luft- zur natürlichen Ölkühlung war jedoch ein schwerer Schritt. Er brachte die Mehrausgabe für den Kasten und das Öl. Der Sprung der Stromdichte von 2 auf $3,5 \text{ A/mm}^2$, den er ermöglichte, war von vornherein schwer belastet. Er mußte eben vor allem die Bezahlung des Ölkastens und des Öles mit Wicklungskupfer und Kerneisen ermöglichen.

Es macht keinen großen Unterschied aus, zu fragen, ob die Erreichung einer Grenzstromdichte von 2 A/mm^2 bei Trockentransformatoren der Lösung des Kühlungsproblems, der Lösung des lästigen Stromwärmeproblems des Transformatorbaus entspreche, oder die Erreichung einer Grenzstromdichte von 4 A/mm^2 bei Öltransformatoren. Für das Baukostenproblem bedeuten beide Grenzstromdichten ungefähr dasselbe. Auf der Hand liegt dagegen die Frage, warum sich denn das Stromwärmeproblem des Transformatorbaus überhaupt eine Grenzstromdichte setzen läßt, warum es uns erledigt erscheint, nachdem wir es gelernt haben, das Kupfer bei natürlicher Ölkühlung mit 4 A/mm^2 zu belasten.

Die treibende Kraft des Stromwärmeproblems war im Transformatorbau dieselbe Kraft, die wir überall im weiten Gebiet des Maschinenbaus, ja überall in der Technik am Werk beobachten konnten und können. Es galt, eine vorgeschriebene Leistung mit möglichst wenig Wicklungskupfer und Kerneisen zu erreichen. Hinter den schweren Kämpfen mit der Wicklungsstromwärme verbarg sich immer der Drang nach Ermäßigung der Baukosten des Transformators.

Es ist klar, daß die treibende Kraft des Stromwärmeproblems erlahmt sein mußte, wenn eine gewisse Stromdichte im Wicklungskupfer als Lösung anerkannt werden konnte. Die oben gestellte Frage muß demnach in die einfachere Form umgegossen werden: Warum verlor im Transformatorenbau die Steigerung der Stromdichte gerade bei ungefähr 4 A/mm^2 ihren Reiz?

Weil es nicht weiter ging? Weil man die Möglichkeiten des Kühlungsproblems erschöpft hatte? Weil die Kühlungseinrichtung allmählich zu teuer wurde, um mit dem ersparten Wicklungskupfer und Kerneisen ordentlich bezahlt werden zu können?

Die vorangehenden Untersuchungen lassen annehmen, daß sich die unermüdlichen Bestrebungen, die Baukosten des Transformators herunterzusetzen, irgendwo in der Nähe von 4 A/mm^2 Wicklungsstromdichte totgelaufen haben mußten, sofern nur die natürliche Ölkühlung in Betracht kam. Sie ziehen indessen keine klare Grenze.

Es liegt eine gewisse Willkür in der Annahme, daß die Luftkühlung der Kastenoberfläche 50°C , die Ölkühlung der Wicklungsfläche dagegen nur 20°C zur Verfügung haben soll. Es ist:

$$50 + \frac{20}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 40 + \frac{40}{2} = 60^\circ \text{C},$$

man kann also die beiden Kühlungsvorgänge auf verschiedene Arten hintereinanderschalten.

Die große Selbständigkeit und Ausgestaltbarkeit der kühlenden Ölkastenoberfläche legt es natürlich nahe, an Verkleinerungen des dem kühlenden Luftstrom dienenden Temperaturunterschiedes zu denken, um sie der Wicklungsfläche nützlich werden zu lassen. Daß sich auf diesem Wege Stromdichtenerhöhungen erreichen lassen müssen, ist klar.

Klar ist es indessen, daß jede Vergrößerung der Kastenoberfläche den Ölkasten verteuert. Daß sie darüber hinaus auch die notwendige Ölmenge vergrößert, ist nicht schwer einzusehen. Zwischen der Wicklung und dem Grund der Ölkastenwellen muß immer ein Mindestabstand vorhanden sein, der Ölbedarf der Kastenwellen wächst dagegen mit der Wellenhöhe.

Man kann zugeben, daß die Dichtengrenze von 4 A/mm^2 bei Öltransformatoren mit natürlicher Kühlung ziemlich verschwommen ist, wenn sie vom Baukostenproblem dem Stromwärmeproblem gezogen werden soll. Das Baukostenproblem hat indessen seine

Gestaltungskraft schließlich ganz verloren. Es hat sich gleichsam im schweren Kampf mit der Stromwärme erschöpft.

In der Tat mußte der Transformatorenbau schließlich erkennen, daß niedrige Baukosten ein Irrlicht sind, das in einen wirtschaftlichen Sumpf lockt. Nicht der billigste Transformator ist das richtige wirtschaftliche Ziel des Transformatorenbaus, sondern die billigste Transformation.

Die Verdoppelung der Stromdichte verkleinert bei vorgeschriebener Stromstärke den erforderlichen Kupferquerschnitt auf die Hälfte. Hälfte sie dabei den Kupferbedarf, so stellt sie wohl nur halbe Wicklungsbaukosten in Aussicht. Sie droht aber anderseits mit der Verdoppelung der Stromwärmemenge. Sie droht die Kosten der Energieverluste der Transformation empfindlich zu erhöhen.

Es ist wohl wahr, daß der verkleinerte Wicklungsquerschnitt immer mit weniger Wickelraum auskommt, daß somit jede Stromdichtenerhöhung auch die mittlere Windungslänge verkleinert und den Eisenkern leichter werden läßt. Trotzdem wachsen bei steigender Wicklungsstromdichte die Energieverluste der Transformation, wie die Erfahrung zeigt.

Der arbeitende Transformator kostet Geld, weil er verzinst und abgeschrieben werden muß, aber auch, weil er selbst Energie verbraucht, weil er sozusagen selbst Stromabnehmer ist. Wenn die Waagschale der Verzinsung und Abschreibung steigt, aufwärtsgedrückt durch die erhöhte Wicklungsstromdichte, die die Baukosten verkleinert, sinkt gleichzeitig die Waagschale der Verlustenergiekosten. Es war kurzfristig, nur die allmählich steigende Waagschale der Baukosten zu sehen. Die wirtschaftliche Waage des Transformatorenbaus mußte sich schließlich zur Gänze durchsetzen. Sie mußte ins Gleichgewicht gebracht werden.

In seinem Buche „Der kupferarme Transformator“ (Berlin, J. Springer, 1935) wies der Verfasser nach, daß es für jeden Transformator eine wirtschaftlichste Leistung gibt, die davon unabhängig ist, was die Kühleinrichtung leisten kann. Sie ist es, die der Stromdichte die richtige Grenze setzt. Sie setzt die Baukosten ins richtige Verhältnis zu den Vollastenergieverlusten.

Die wirtschaftlichste Leistung ist erreicht, wenn die Jahresverlustarbeit des Transformators das Dreifache dessen kostet, was die Bau- bzw. die Anschaffungssumme an Zinsen und Abschreibungen im Jahre beansprucht. Dabei stehen die Verzinsungs- und Ab-

schreibungskosten der Kühleinrichtung auf der Verlustenergieseite der Jahresabrechnung (L. 2, S. 19).

Es muß zugegeben werden, daß die wirtschaftlichste Leistung des bauenden Ingenieurs ein mittleres, wahrscheinliches Belastungsschaubild des arbeitenden Transformators voraussetzt und deshalb nicht ins Schwarze treffen kann. Deshalb muß auch zugegeben werden, daß das Anstreben der billigsten Transformation nur eine verschwommene Stromdichtengrenze ziehen kann.

Merkwürdigerweise scheint nun bei natürlicher Ölkühlung auch die wirtschaftlichste Leistung die Wicklungsstromdichte in der Nähe von 4 A/mm^2 festhalten zu wollen. Die Anstrengungen des Kühlungsproblems, die Jagd nach niedrigen Baukosten und die richtige Verfolgung der niedrigsten Transformationskosten scheinen die gleiche Stromdichtenhöhe erreichen zu wollen.

Daß dies ein außerordentlich befriedigendes Ergebnis jahrzehntelanger Kämpfe darstellt, kann schwer geleugnet werden. Andererseits verdunkelt es die Hintergründe des Wicklungsstromwärmeproblems außerordentlich. Noch heute glaubt man, daß für die Nennleistung des Transformators die Kühleinrichtung maßgebend ist. Sie ist in Wirklichkeit schon lange maßnehmend (L. 2, S. 20).

Es ist jedenfalls wichtig, festzustellen, daß das Stromwärmeproblem im Transformatorenbau ungefähr in dem benötigten Ausmaße gelöst wurde, d. h., daß es heute jene Stromdichten gerade noch gestattet, die eine wirtschaftlich einwandfreie Transformation ermöglichen. Es ist sehr wichtig, zu wissen, daß erheblich größere Belastungen als es die wirtschaftlichste Nennleistung ist, mit den errungenen Kühleinrichtungen nicht zu bewältigen sind, wenn die 110° -Temperaturgrenze unverrückbar ist und wenn künstliche Steigerungen der Wärmemitnahmeerträge verschmäht werden.

Die künstliche Kühlung ist bei kleinen und mittleren Leistungen aus wirtschaftlichen Gründen unanwendbar. Sie belastet die Verlustenergierechnung zu stark, mittelbar und unmittelbar. Unmittelbar durch Erhöhung der Stromdichte — sie wird ja nur deshalb eingesetzt —, mittelbar, weil sie die Kosten der Ölpumpe oder des Gebläses den bereits vorhandenen Kühleinrichtungskosten hinzufügt und den Energiebedarf der Kühlmittelbeschleunigung nicht anders bewerten lassen darf als das Kupfer und das Eisen ihren Energiebedarf bewerten. Nur ganz große Transformatoren rechtfertigen die

Anwendung der künstlichen Kühlung. Sie sind es, die unter Umständen ihre wirtschaftlichste Leistung dauernd merklich überschreiten können, ohne die Erwärmungsvorschriften zu verletzen. Aber auch ganz große, künstlich gekühlte Transformatoren können kaum dauernd die doppelte wirtschaftlichste Leistung tragen.

6. Belastungstemperatur und Lebensdauer des Transformators

Die Tatsache, daß die Transformatoren fast durchwegs eine derart knapp bemessene Kühleinrichtung besitzen, daß sie bei der Nennleistung die Temperaturgrenze von 110°C ungefähr erreichen, wenn nur die Umgebungstemperatur die zulässigen 35°C aufweist, läßt jede dauernde Überlastung unzulässig erscheinen, solange die Umgebungstemperatur nicht unter 35°C sinkt. Sie läßt auch jede vorübergehende Überlastung gefährlich erscheinen, sofern sie einer bereits lange dauernden, gerade noch erlaubten, d. h. die 110°C -Grenze berührenden, Belastung folgt, ihr also gleichsam aufgesetzt wird.

Nun gibt es Überlastungen, die unangemeldet über den Transformator herfallen, die nicht abgewendet werden können, weil sie vom Zufall heraufbeschworen werden, Überlastungen, die die Nennleistung mehrfach überwiegen, die der zehnfachen, zuweilen der zwanzigfachen Nennleistung gleichkommen können. Der Kurzschluß bedeutet für den Transformator unter allen Umständen eine außerordentliche Belastung — die höchste, die unter den gegebenen Umständen möglich ist.

Es ist vollständig klar, daß der Kurzschluß ein ganz und gar unerlaubter Belastungsfall ist, wenigstens dann, wenn er den bereits voll erwärmten Transformator befällt und wenn tatsächlich jede Überschreitung der 110°C -Grenze verderbenbringend ist. Daran kann die Tatsache, daß die Kurzschlüsse rasch abgeschaltet werden, nichts ändern. So schnell sie auch vorübergehen mögen, ihre Wicklungsstromdichten sind jedenfalls furchtbar und für das Stromwärmeproblem unerhörte Schläge.

Der Kurzschluß reißt ein Loch in die mühsam erkämpfte Lösung des Stromwärmeproblems des Transformators. Man kann, um es zu stopfen, hoffen, daß der Kurzschluß dann losschlagen wird, wenn die Umgebungstemperatur einige von den ihr erlaubten 35°C erspart hat und daß er so kurzlebig sein wird, daß er gerade noch mit der

ersparten Temperaturspanne abgefertigt sein wird. Man könnte auch wohl eigens für Kurzschlüsse kleine Temperaturrücklagen vorsehen. Aber auf diese Weise ist das Kurzschlußstromwärmeproblem kaum lösbar. Schwere Kurzschlüsse lassen sich mit einigen Celsiusgraden nicht sättigen. Der ganze der Nennleistung zur Verfügung stehende Temperaturunterschied von 70°C ist sehr oft zu klein, um die Kurzschlußstromwärme aufzufangen.

Es ist leicht, nachzuweisen, daß satte Kurzschlüsse tatsächlich ganz neue Stromwärmeprobleme aufrollen, daß sie die 110°C -Grenze in keiner Weise gelten lassen, daß sie dem Wicklungskupfer mit 150, 200, ja selbst mit 250°C Höchsttemperatur drohen können. Dieser wichtige Nachweis soll sofort erbracht werden.

Wenn z. B. der Kurzschlußstrom den normalen Vollaststrom zehnmal übersteigt — sehr oft gibt es noch viel gewaltigere Unterschiede, —, so belastet er das Wicklungskupfer mit 40 A/mm^2 , wofern normal 4 A/mm^2 vorhanden sind. Solchen überwältigenden Stromdichten gegenüber muß die Kühleinrichtung natürlich vollständig versagen. Man macht keinen beachtenswerten Fehler, wenn man annimmt, daß sie aufhört zu arbeiten.

Die ganze Kurzschlußstromwärme wird dann offenbar im Wicklungskupfer aufgespeichert. Nach Gl. (5) hat man bei 40 A/mm^2 in jeder Kurzschlußsekunde eine Temperaturerhöhung von rund 10°C im Kupfer zu erwarten. Dauert also der Kurzschluß mehrere Sekunden — zuweilen muß er verhältnismäßig lange am Leben gelassen werden —, so erhebt sich das Wicklungskupfer hoch über die erlaubte Höhe von 110°C . Ist das nicht der Tod?

Wenn es wirklich wahr ist, daß jede Überschreitung der 110°C -Grenze todbringend ist, gibt es keine Lösung des Kurzschlußstromwärmeproblems. Stellt man sich jedoch auf den Standpunkt, daß nur dauernde Überschreitungen der 110°C -Grenze unheilvoll sind, so gibt es wohl Lösungen. Jeder Kurzschluß würde dann vielleicht nur ein Stück Leben des Transformators wegspäulen.

Verträgt denn der Transformator die erlaubten 110°C wirklich dauernd, d. h. ewig? Ist es denn nicht bekannt, daß er nur mit einer Lebensdauer von 15, auch 20, zuweilen sogar 25 Jahren rechnen darf? Woran stirbt er denn eigentlich? Das Kupfer und das Eisen können Jahrhunderte überdauern. Das Ölbad kann bequem erneuert werden, wenn es unbrauchbar wird. Der Transformator stirbt offenbar an der Schwäche seiner Isolierstoffe.

Es ist sehr merkwürdig, daß man so spät den wahren Hintergrund der 110°C -Regel zu untersuchen begann. Eine einfache, vorurteilsfreie Besinnung hätte doch längst schon gezeigt haben müssen, daß die Isolierstoffe die erlaubten 110°C eben doch nicht dauernd vertragen, sondern nur einige Jahre. Man hätte dann höhere Temperaturen gerechter beurteilen können und vor allem den einzigen Weg zu einer ordentlichen Lösung des Kurzschlußstromwärmeproblems entdecken müssen.

Überzeugt, daß die Isolierstoffe des Transformators dauernd 110°C vertragen, im Banne eines alten Glaubens also, griff der amerikanische Transformatorbau vor ungefähr einem Jahrzehnt energisch nach dem scheinbar Erreichbaren: Er ging daran, das Temperaturgebiet unterhalb 110°C restlos auszunützen.

Die Umgebungstemperatur von 40°C , mit der die Amerikaner rechnen, ist natürlich nur ausnahmsweise wirklich vorhanden. Im Laufe des Betriebsjahres ergeben sich größere und kleinere Temperaturlücken, die doch nach der 110°C -Regel von der Betriebs Erwärmung ausgefüllt werden dürfen. Man begann somit Temperaturüberwachungsvorrichtungen zu bauen, die, passend eingebaut, zu sorgen hatten, daß der arbeitende Transformator die Temperaturgrenze nicht überschritt. Daß man dabei die Nennleistung nicht mehr als Grenzleistung anerkennen wollte, ist klar. Die früher unverrückbare Nennleistung wich der neuen Grenztemperaturleistung, der beweglichen Raubbauleistung.

Die scharfe Bezeichnung — vom Verfasser eingeführt (L. 3, S. 49) — ist gerechtfertigt. Der amerikanische Transformatorbau sah sich sehr bald gezwungen, den Gefahren der Grenztemperaturleistung mit umfangreichen Laboratoriumsarbeiten nachzugehen. Dabei stellte es sich heraus, daß die üblichen Isolierstoffe 110°C nur etwa $4\frac{1}{2}$ Jahre dauernd vertragen. Man fand ferner ihre Lebensdauer praktisch nur von der Temperatur abhängig. Schließlich entdeckte man sogar ein einfaches, überaus scharfes Lebensdauergesetz: Je 8°C Temperaturerhöhung bedeuten eine Hälf tung der Lebensdauer, umgekehrt bringen natürlich je 8°C Temperaturermäßigung eine Lebensdauerverdoppelung.

Von der Lebensdauer von $4\frac{1}{2}$ Jahren, die einer ständigen Betriebstemperatur von 110°C entspricht, ausgehend, kann man demnach das Lebensdauergesetz des Transformators in die Form:

$$Y = 4,5 \cdot 2^{\frac{110 - \theta}{8}} \quad \text{Jahre} \quad \dots \dots \dots (6)$$

bringen, wenn man mit

Y = die Lebensdauer (Jahre) und

ϑ = die Betriebskupferhöchsttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

bezeichnet.

Das neue Gesetz (L. 3, S. 52) bedeutet natürlich das Ende der „dauernd zulässigen Grenztemperatur von 110°C “. Jede Temperatur ist nun zulässig, keine wirklich dauernd. Jeder Betriebskupferhöchsttemperatur entspricht eine genau bestimmte Lebensdauer. Bei wechselnder Belastung wechselt also die Lebensgeschwindigkeit des Transformators. Dauernd bis zur 110°C -Grenze ausgenutzt, könnte er nur $4\frac{1}{2}$ Jahre leben. An der Nennleistung, die ja auch die wirtschaftlichste Leistung sein kann und soll, festhaltend, lebt er im Sommer schnell, im Winter langsam. Er schont seine Lebenskräfte außerordentlich, wenn er unterbelastet arbeitet. Er leidet gleichsam im verzehrenden Fieber, wenn er vom Kurzschluß betroffen wird. So kommt es, daß er uns statt $4\frac{1}{2}$, volle 15, 25 und auch mehr Jahre lebt. So kam es, daß die amerikanische Grenztemperaturleistung als Raubbauleistung gebrandmarkt werden mußte.

Das Kurzschlußstromwärmeproblem hat nun einen klaren Weg vor sich. Es muß mit außerordentlich hohen, jedoch rasch vorübergehenden Betriebstemperaturen rechnen. Es sieht, daß es den Kurzschlüssen Lebensdaueropfer bringen muß. Nachdem es nun aber klar ist, daß auch das gewöhnliche Stromwärmeproblem ohne Lebensdaueropfer nicht auskommen kann, kommt es offenbar nur darauf an, die Kurzschlußopfer in ein vernünftiges Verhältnis zu den unausweichlichen Nennleistungsopfern zu setzen.

Die Schärfe des Montsingerschen Lebensdauergesetzes verleiht dem Kurzschlußstromwärmeproblem eine unverkennbare Schärfe. An Hand der Gl. (6) überzeugt man sich leicht, daß bei einer Kurzschlußkupfertemperatur von 300°C das ganze Leben des Transformators in 10 kurzen Sekunden verbraucht wäre und daß man auch bei 250°C , die vielfach als zulässige Kurzschlußkupfertemperatur genannt werden, die ganze Lebensdauer des Transformators auf rund 13 Minuten zusammendrängen würde.

So entsteht von selbst die bange Frage: Wie schwer sind denn die zu erwartenden Kurzschlüsse, wie oft kommen sie vor, wie lange dauern sie? Es ist die letzte Frage des alten Stromwärmeproblems. Ihr gelten die Untersuchungen dieser Studie, die die Gefahren der Transformatorenkurzschlüsse schildern will.

7. Kurzschlußsicherheit des Transformators.

Kurzschlußstromwärme- und Kurzschlußstromkraftproblem

Das Problem der Kurzschlußsicherheit des Transformators ist praktisch merkwürdigerweise nicht aus dem alten Stromwärmeproblem entstanden, obwohl es, wie wir gesehen haben, zweifellos darin eine kräftige Wurzel verbirgt. Es gibt nämlich zwei Äste des Kurzschlußsicherheitsproblems, einen thermischen und einen mechanischen. Die mechanische Kurzschlußsicherheit hat nun den Transformatorenbau viel mehr beschäftigt als die thermische.

Vielleicht ist es die unglückliche 110°C-Regel, die diese Entwicklung des Kurzschlußproblems verschuldet hat. Überzeugt, daß es gegen die Grenztemperaturüberschreitungen im Kurzschluß kein Mittel gibt, betrachtete der Transformatorenbau das Kurzschlußstromwärmeproblem stillschweigend als unlösbar und behandelte es deshalb ungern. Er sah dagegen Abwehrmittel gegen die Kurzschlußstromkräfte. Deshalb sprach er mit Vorliebe vom Kurzschlußstromkraftproblem.

Dazu kam noch der Umstand, daß die Starkstromtechnik in ihrer frühesten Jugend viel mit den Verbrennungsgefahren der Kurzschlüsse zu kämpfen hatte und auch schon früh ausgiebige Abwehrmittel fand. Sie lernte es, Kurzschlüsse rasch abzuschalten, betrachtete sie als Betriebsunfälle, die einfach unterdrückt werden müssen und übertrug ihre etwas robusten allgemeinen Erfahrungen und Lösungen auf den Transformatorenbau, ohne sich viel mit den dabei zu berücksichtigenden Besonderheiten des Problems zu beschäftigen.

Die Stromkraftgefahr lernte die Starkstromtechnik verhältnismäßig spät wirklich kennen. Im Transformatorenbau tauchten erst knapp vor dem Weltkriege — etwa im Jahre 1912 — so große Einheiten auf, daß wirklich gefährliche Kurzschlußstromkraftstöße sichtbar wurden und berücksichtigt werden mußten. Außerdem stellten sich im Transformatorenbau sehr große Leistungen ziemlich unvermittelt ein. Das überraschende Auftreten des Kurzschlußstromkraftproblems erklärt die große, die zum Teil übertriebene Aufmerksamkeit, die in der Folge dem mechanischen Teil des Kurzschlußsicherheitsproblems geschenkt wurde.

Warum mußten nun erst große Leistungen kommen, bevor man die Stromkräfte im Transformatorenbau wirklich zu be-

achten begann? Um diese wichtige Frage beantworten zu können, müssen wir die den Transformator bedrohende Stromkraft kurz beschreiben.

Zwei parallele, von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossene Leiter stoßen einander bekanntlich ab. Die dabei wirkende Stromkraft ist nach dem Gesetz von Biot-Savart der Stromstärke des von der Kraft erfaßten Leiters proportional. Sie ist auch der Dichte des magnetischen Kraftflusses an der Stelle, wo der erfaßte Leiter liegt, proportional. Den Kraftfluß erregt natürlich an der bezeichneten Stelle der Strom des zweiten Leiters. Es kommt

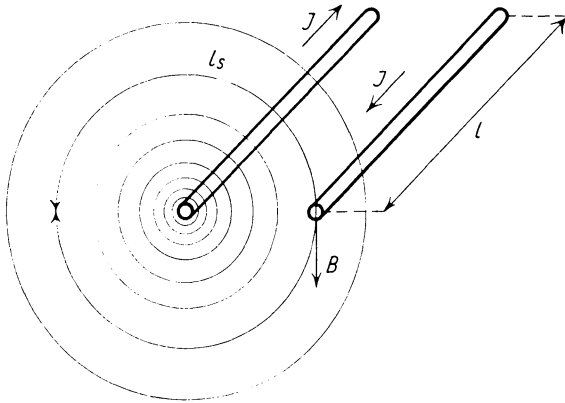


Abb. 6

schließlich noch darauf an, wie lang der erfaßte Leiter ist, wobei natürlich vorausgesetzt wird, daß er durchwegs im Kraftfluß derselben Dichte liegt. Randprobleme können unberücksichtigt bleiben.

Entsprechend der Abb. 6 bezeichnen wir mit:

- I = die augenblickliche Stromstärke der beiden Leiter (A),
- B = die Kraftflußdichte an der Stelle, wo der erfaßte Leiter liegt (G),
- l = die Leiterlänge (cm) und
- l_s = die Länge der den einen Leiter umschlingenden und den anderen Leiter gerade schneidenden Kraftlinie (cm).

Die Biot-Savartsche Stromkraft beträgt dann:

$$K = B \cdot I \cdot l \cdot 10^{-1} \text{ Dyn} = \frac{B \cdot I \cdot l \cdot 10^{-6}}{9,81} \text{ kg} \dots (7)$$

wobei natürlich:

$$B = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{I}{l_s}$$

ist, wenn mit der Luftpermeabilität gerechnet werden darf. Es ergibt sich also die Gleichung:

$$K = \frac{4\pi}{9,81} \cdot \frac{l}{l_s} \cdot I^2 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \dots \dots \dots (7a)$$

Es ist nicht schwer, zu erkennen, daß die primären und die sekundären Windungen des Transformators parallele Leiter darstellen, die von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen werden. Man überzeugt sich ferner leicht, daß die Gesamtheit der primären Windungen einen einzigen Leiter ersetzt, der einen genau so großen Strom führen würde wie die Gesamtheit der sekundären Windungen. Bei dieser Feststellung wird allerdings der immer vorhandene primäre Leerlaufstrom vernachlässigt.

Man sieht, die primäre und die sekundäre Phasenwicklungshälfte des Transformators stoßen einander immer ab. Wie groß die abstoßende Stromkraft wird, muß Gl. (7a) aussagen. Ihr I bedeutet jetzt natürlich die Durchflutung der Phasenwicklungshälfte. Ihr l vertritt die mittlere Windungslänge. Schließlich kann ihr l_s nur die sogenannte reduzierte Streulinienlänge bedeuten.

Ohne Sorge kann man annehmen, daß das Verhältnis $l:l_s$ bei wachsender Leistung des Transformators annähernd fest bleibt. Dann erkennt man, daß die den Transformator bedrohende Stromkraft mit dem Quadrat der Wicklungsdurchflutung wächst.

Die Wicklungsdurchflutung eines gegebenen Transformators wird im Kurzschluß am größten. Das Stromkraftproblem des Transformators erhebt sich von selbst zum Kurzschlußstromkraftproblem. Die Wicklungsdurchflutung eines großen Transformators ist andererseits größer als die Wicklungsdurchflutung einer kleinen Einheit. Deshalb ist der Großtransformatorenbau das Gebiet großer Kurzschlußstromkräfte und deshalb mußte man erst knapp vor dem Weltkriege beim überraschenden Auftreten großer Leistungen plötzlich auf die Kurzschlußstromkraftgefahr aufmerksam werden.

Nicht immer stehen die beiden Durchflutungen der Phasenwicklungshälften auf einer einzigen Front einander gegenüber. Die Scheibenspulenwicklungsanordnung (Abb. 7) schafft z. B. eine ganze Reihe von Fronten, weil sie primäre und sekundäre Spulen ab-

wechselnd nebeneinander auf die eiserne Säule setzt. Daß dabei die Phasenwicklungsdurchflutungen zerlegt werden, ist klar. Daß dabei gleichzeitig die Stromkraft stark gedrückt wird, geht aus Gl. (7a)

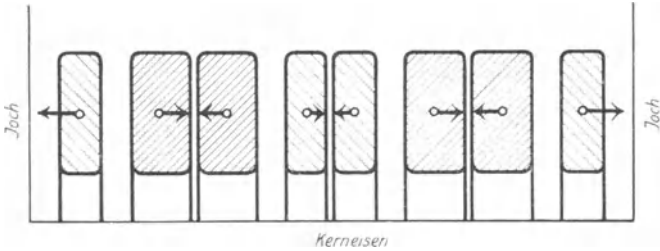


Abb. 7

sobald hervor. Ihr I bedeutet dann nur noch die Halbspulendurchflutung.

Vor dem Auftreten des Großtransformators war die Scheibenspulenwicklungsanordnung sehr beliebt, ganz besonders im Trockentransformatorbau. Dies erklärt die geringe Bedeutung der Kurzschlußstromkräfte im jungen Transformatorbau. Sie konnten sich, wie Abb. 7 zeigt, bei Scheibenspulenordnungen ohnehin nur an den Endspulen der Säule bemerkbar machen.

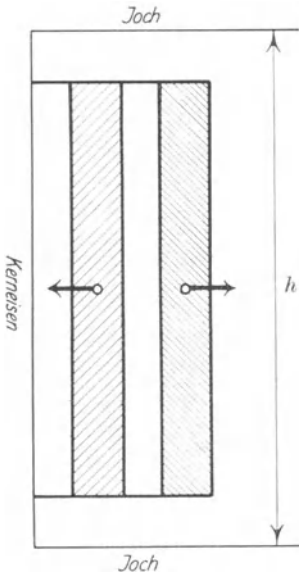


Abb. 8

Es gab eine Menge von Gründen, die den Großtransformatorbau zwangen, entschlossen auf der ganzen Linie die Zylinderwicklung (Abb. 8) einzuführen. Sie zog sofort die Durchflutungen der Phasenwicklungshälften in zwei Lagern zusammen. Sie brachte allerdings einen wertvollen Beitrag in den Kampf mit der Kurzschlußstromkraft: Die mechanische Mitwirkung des Wicklungskupfers. Bei der Scheibenspulenwicklung widersetzt sich, wie aus Abb. 7 sofort erkennbar, das Wick-

lungskupfer der Stromkraft in keiner Weise. Die bedrohten Endspulen dieser Wicklung müssen deshalb ausgiebig gegen die beiden

Joche abgestützt werden. Bei der Zylinderwicklung wirkt die Stromkraft auf das Kupfer der außenliegenden Phasenwicklungshälfte wie der Dampfdruck auf die innere Kesselwand. Die Kurzschlußstromkraft des großen Transformators droht somit eine Wicklungssprengkraft zu werden.

Unwillkürlich denkt man an die Zugspannungen, die sich unter dem Einfluß der Stromkraft im äußeren Kupferzylinder des großen Transformators einstellen müssen. Beträgt der Kupferquerschnitt dieses Zylinders F_k Quadratzentimeter, so erreicht die Zugspannung, wie aus Abb. 9 ersichtlich ist, die Höhe von

$$\sigma_z = \frac{K}{2\pi \cdot F_k} \text{ kg/cm}^2 \dots \dots \dots (8)$$

Bezeichnet man noch mit:

$$g = \frac{I}{F_k} \cdot 10^{-2} \text{ A/mm}^2$$

die augenblickliche Stromdichte im äußeren Wicklungszylinder, so kann man die beiden Gleichungen (7a) und (8) zu:

$$\sigma_z = \frac{2}{9,81 \cdot 8,9 \cdot 6} \cdot \frac{G_k}{l_s} \cdot g^2 = 3,82 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{G_k}{l_s} \cdot g^2 \dots \dots (8a)$$

vereinigen, wenn man das Gesamt-kupfergewicht des dreiphasigen Transformators zu:

$$G_k = 6 \cdot F_k \cdot l \cdot 10^{-3} \cdot 8,9 \text{ kg}$$

ansetzt.

Die Rechnung ist reichlich ungenau. Zunächst müßte berücksichtigt werden, daß die Windungen des äußeren Wicklungszylinders nicht alle im gleich dichten Streukraftfluß liegen. In vereinfachten Streuflußbildern nimmt man bekanntlich eine lineare Dichtenabnahme vom Wicklungszwischenraum aus bis zum äußeren Wicklungsumfang an. Wenn daher in gewohnter Weise für die reduzierte Streulinienlänge l_s einfach die Säulenlänge h (Abb. 8) eingesetzt wird, muß der Ertrag der Gl. (8a) gehälftet werden.

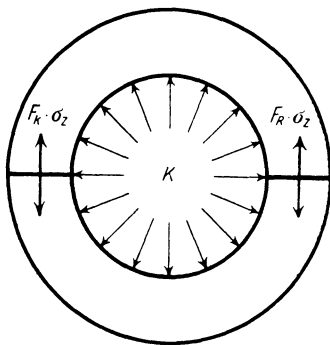


Abb. 9

Wenn anderseits für l die mittlere Windungslänge der äußeren Wicklung eingesetzt wird, muß berücksichtigt werden, daß die äußere Phasenwicklungshälfte meist viel schwerer ist als die innere. Sie hat nicht nur längere Windungen, sondern verlangt auch kleinere Stromdichten. Ihr Gewicht übersteigt deshalb erheblich ein Sechstel des Gesamtkupfergewichts. So kommt man schließlich zum Ausdruck:

$$\sigma_z \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{G_k}{h} \cdot g^2 \text{ kg/cm}^2 \dots \dots \dots (9)$$

Mit ihm ist ein guter Überblick über das Kurzschlußstromkraftproblem erreicht. Man sieht vor allem die Zugspannung im Kupfer, verursacht durch die Stromkraft, mit dem auf ein Zentimeter Säulenlänge entfallenden Gesamtkupfergewicht wachsen. Selbstverständlich muß man erwarten, daß dieses auf die Säulenlänge bezogene Kupfergewicht mit wachsender Leistung rasch zunimmt. Dicke Säulen werden höher bewickelt als dünne, sie erzwingen auch größere Windungslängen. Der große Transformator hat zweifellos viel mehr Anlaß, seine Kupferzugspannung bei Stromkraftangriffen zu beobachten als der kleine.

Erreicht indessen ein großer Transformator 20 kg Gesamtkupfergewicht je Zentimeter Säulenlänge, so droht ihm bei der Stromdichte von 1 A/mm² zunächst nur eine Kupferzugspannung von 60 g/cm². Erst bei einer Stromdichte von 100 A/mm² stünde er vor der vielleicht schon bedenklichen Spannung $\sigma_z = 600 \text{ kg/cm}^2$.

Ist denn im satten Kurzschluß die gewiß gewaltig erscheinende Stromdichte von 100 A/mm² ausgeschlossen? Wir rechnen bei der normalen Nennleistung mit 4 A/mm². Dies ist jedoch eine effektive Stromdichte; die höchste Augenblicksdichte ist natürlich um 41 % höher. Verzehnfacht sich nun im Kurzschluß die Stromstärke, so ist die Augenblicksdichte, die wir fürchten, gut zur Hälfte erreicht. Sie wird überschritten, wenn der Kurzschlußstrom den Nennstrom 20mal übersteigt.

Das Kupfer ist ein merkwürdiger Baustoff. Es hat keine ausgesprochene Federungsgrenze. Verhältnismäßig niedrige Zugspannungen hinterlassen bereits bleibende Dehnungen in ihm. Vorsichtig bauende Ingenieure halten 300 kg/cm² Zugspannung für höchstzulässig, wenn sie das Kurzschlußstromkraftproblem behandeln.

Man sieht: Auch der mechanische Ast des Kurzschlußsicherheitsproblems stellt dem Transformatorenbau die Frage, wie hoch die Stromdichte im Kurzschluß des Transformators werden kann. Für das Kurzschlußstromkraftproblem scheint indessen der Höchstwert der Kurzschlußstromdichte wichtig zu sein, nicht ihr Effektivwert.

Das für Sinusströme geltende Verhältnis $\sqrt{2}:1$ der höchsten Dichte zur effektiven umspannt jedoch nicht den vollen Unterschied der Fragestellung der beiden Kurzschlußteilprobleme. Im plötzlichen Kurzschluß gibt es bekanntlich noch Ausgleicherscheinungen, die verwickelte Verhältnisse schaffen.

Jedenfalls ist es ungemein wichtig, klarzustellen, wie groß die doppelte Gefahr des Transformator Kurzschlusses werden kann. Die Untersuchungen dieser Studien können, wie wir sehen, einen Weg einschlagen, von dem aus man beide Seiten des Kurzschlußsicherheitsproblems gut überblicken kann. Sie können der Hauptfrage unbeirrt folgen: Wie groß können die Kurzschlußströme des Transformators werden?

I. Der dreiphasige Kurzschluß

8. Der symmetrische ungeschwächte dreiphasige Klemmenkurzschluß

Spricht man vom dreiphasigen Kurzschluß des dreiphasigen Transformators, so setzt man stillschweigend voraus, daß es sich um einen Kurzschluß handelt, der alle drei Phasen des Transformators in gleicher Weise befällt. Es ist ein symmetrisches dreiphasiges Bild, das man also vor Augen hat. Unsymmetrische Belastungsbilder spaltet man eben vorteilhaft in rein symmetrische, die natürlich dreiphasig bleiben und rein unsymmetrische, die man einphasig machen kann. Die folgende Untersuchung soll demnach zunächst dem symmetrischen dreiphasigen Kurzschluß gelten.

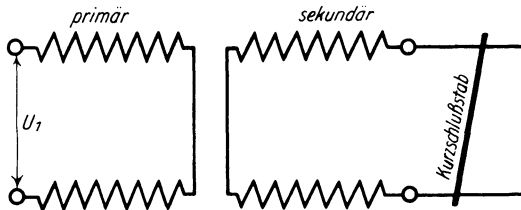


Abb. 10

Die damit gesicherte Ebenbürtigkeit der drei Phasen des Transformators führt sofort den dreiphasigen Kurzschluß des dreiphasigen Transformators auf den einfacheren Fall des Kurzschlusses eines einphasigen Transformators zurück. Die Vereinfachung, die dabei den anzustellenden Untersuchungen gewonnen wird, ist indessen nicht die einzige, die man zunächst anstreben muß.

Der einphasige Transformator wird kurzgeschlossen, wenn ein kräftiger Leiter die sekundär abgehenden Leitungen überbrückt (Abb. 10). Es ist augenscheinlich nicht einerlei, wo die Kurzschlußbrücke in den abgehenden Leitungen geschlagen wird. Geschieht es unmittelbar hinter den Sekundärklemmen, so spricht man vom Klemmenkurzschluß, auch vom satten Kurzschluß. Das

Problem des dreiphasigen Kurzschlusses wird wesentlich vereinfacht, wenn man es auf das Problem des dreiphasigen Klemmenkurzschlusses zusammenpreßt, was wir zunächst tun wollen.

Der Transformator hat nun auch noch seine Primärseite. Vor dem Eintritt des Kurzschlusses liegt auf den Primärklemmen die normale Netzspannung. Es ist schwer, anzunehmen, daß der Kurzschluß das Primärnetz unberührt läßt. Er kann doch mit seinen großen Strömen über das Primärnetz hinaus auf die Stromerzeuger drücken und die Primärnetzspannung beeinflussen. Nur wenn die Leistung des kurzgeschlossenen Transformators im Vergleich mit der Leistung des Primärnetzes klein ist, kann man die primären Rückwirkungen des Kurzschlusses vernachlässigen und annehmen, daß die primär dem Transformator aufgedrückte Spannung während des Kurzschlusses ungeschwächt bleibt. Diese Annahme verspricht eine weitere Vereinfachung des zu behandelnden Problems. Wir wollen sie zunächst zulassen und kommen auf diese Weise zum ungeschwächten Kurzschluß. So ergibt sich als vorläufiges Ziel der symmetrische ungeschwächte dreiphasige Klemmenkurzschluß des dreiphasigen Transformators.

Dieses Ziel vor Augen und vom einfachen Fall des einphasigen Transformators (Abb. 10) ausgehend, bezeichnen wir mit:

U_1 = die primär aufgedrückte effektive Spannung (V),

U_{1t} = ihren Augenblickswert (V),

Φ_t = den Augenblickswert des Hauptkraftflusses des Transformators (M),

w_1 = die primäre,

w_2 = die sekundäre Windungszahl,

R_1 = den primären,

R_2 = den sekundären Wirkwiderstand der Wicklung (Ω),

X_1 = den primären,

X_2 = den sekundären Blindwiderstand der Wicklung (Ω),

L_1 = die Induktivität der primären,

L_2 = die Induktivität der sekundären Wicklungshälfte (H),

I_{1t} = die Augenblicksstärke des primären,

I_{2t} = die Augenblicksstärke des sekundären Kurzschlußstroms (A) und

$\omega = 2\pi f =$ die elektrische Winkelgeschwindigkeit, entsprechend der Periodenzahl f (s^{-1}).

Um nicht ins Uferlose zu geraten, setzen wir eine sinusförmige primäre Netzspannung voraus:

$$U_{1t} = U_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \dots \dots \dots (10)$$

wobei α ein beliebiger fester Zeitwinkel ist.

Wir vernachlässigen ferner den Leerlaufstrom des Transformators, der im Kurzschluß selbstverständlich eine ungemein bescheidene Rolle spielt. Daß U_1 die Phasenspannung des dreiphasigen Primärnetzes vertritt, ist klar.

Ist nun der Klemmenkurzschluß vollkommen, so daß der die Klemmen überbrückende Leiter keine Spannung für den ihn durchfließenden Strom I_{2t} braucht, so muß in jedem Augenblick die vom Hauptkraftfluß sekundär induzierte Spannung von den Widerstandsspannungen der Sekundärwicklung genau aufgewogen werden. Diese Tatsache ergibt die erste Ansatzgleichung des Problems:

$$w_2 \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} + R_2 \cdot I_{2t} + L_2 \cdot \frac{dI_{2t}}{dt} = 0 \dots \dots \dots (11)$$

Auf der Primärseite hält die vom Hauptkraftfluß induzierte Wicklungsgegenspannung im Verein mit den Widerstandsspannungen der aufgedrückten Netzspannung in jedem Augenblick das Gleichgewicht. Dies führt zur zweiten Ansatzgleichung:

$$U_{1t} = w_1 \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} + R_1 \cdot I_{1t} + L_1 \cdot \frac{dI_{1t}}{dt} \dots \dots \dots (12)$$

Enthält nun, wie oben angenommen, I_{1t} den primären Leerlaufstrom nicht, so muß natürlich:

$$w_1 \cdot I_{1t} = -w_2 \cdot I_{2t} \dots \dots \dots (13)$$

das magnetische Gleichgewicht der Belastungsströme des Kurzschlusses sichern. Damit ist die dritte Ansatzgleichung des Problems gewonnen.

Aus den drei Gleichungen (11), (12) und (13) kann man eine einzige, sehr einfache Ansatzgleichung gewinnen, wenn man den Hauptkraftfluß Φ_t herauswirft:

$$U_{1t} = \left[R_1 + R_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right] \cdot I_{1t} + \left[L_1 + L_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right] \cdot \frac{dI_{1t}}{dt} \dots \dots (14)$$

Damit ist eine vorläufige Lösung des behandelten Problems bereits erreicht.

Sie zeigt vor allem, daß der Hauptkraftfluß des kurzgeschlossenen Transformators eine ganz unwichtige Größe ist. Er macht sich nur in den Beziehungen der beiden Wicklungshälften zueinander bemerkbar, nach außen bleibt er vollkommen unsichtbar.

Für den Außenstehenden schrumpft der kurzgeschlossene Transformator zu einer Drosselspule mit Wirkwiderstand zusammen. Dabei ist die Aufteilung der Wirk- und Blindwiderstände auf die beiden Wicklungshälften ganz unwesentlich, solange:

$$R' = R_1 + R_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2, \dots \dots \dots (15)$$

der auf die Primärseite reduzierte Gesamtwirkwiderstand, und

$$L' = L_1 + L_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2, \dots \dots \dots (16)$$

die auf die Primärseite reduzierte Gesamtinduktivität des Transformators, unverändert bleiben. Dasselbe gilt natürlich auch von:

$$X' = X_1 + X_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2, \dots \dots \dots (16a)$$

vom auf die Primärseite reduzierten Gesamtblindwiderstand des kurzgeschlossenen Transformators. Vom Kurzschluß des einphasigen auf den symmetrischen dreiphasigen Kurzschluß des dreiphasigen Transformators zurückschließend, erhält man dieselben Ergebnisse für jede der drei Transformatorphasen.

So erhält man schließlich für die weitere Behandlung des in Angriff genommenen Problems das überaus einfache Ersatzschaltbild der Abb. 11 als endgültigen Ausgangspunkt. Kann man

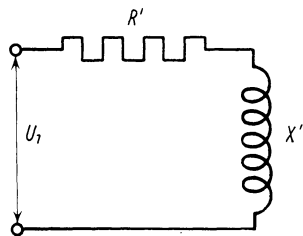


Abb. 11

darin auch noch den Wirkwiderstand unterdrücken, was sehr oft möglich ist, ganz besonders dann, wenn man keine genauen Ergebnisse anstrebt, so hat man es mit einer einfachen Drosselspule zu tun und sieht vieles ohne Rechnung sofort.

9. Dauerkurzschlußstrom und Ausgleichskurzschlußstrom

Die Zurückführung des Falles eines kurzgeschlossenen einphasigen Transformators auf den Fall einer einfachen Drosselspule

mit Wirkwiderstand, die auch für den dreiphasigen symmetrischen Kurzschluß des dreiphasigen Transformators sofort verwendbar ist, ist natürlich längst bekannt. Aus den theoretischen Grundlagen der Elektrotechnik ist auch die Lösung der wichtigen Ansatzgleichung (14), die wir nun in der einfacheren Form:

$$U_{1t} = R' \cdot I_{1t} + L' \cdot \frac{dI_{1t}}{dt} \dots \dots \dots (14a)$$

schreiben können, bekannt. Sie lautet für eine sinusförmige Spannung U_{1t} (Gl. 10):

$$I'_{1t} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\sqrt{R'^2 + (\omega L')^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \dots \dots \dots (17)$$

wobei:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L'}{R'} \dots \dots \dots (18)$$

ist.

Die beiden Gleichungen (17) und (18) bestimmen allerdings nur ein Teilintegral der auf Gl. (10) gestützten Differentialgleichung (14a). Sie bestimmen den sogenannten dauernden Kurzschlußstrom des Transformators, jenen Kurzschlußstrom also, der ungeschwächt beliebig lange erhalten bleiben kann, wenn sich an den Primär- und an den Sekundärklemmen die Kurzschlußzustände nicht ändern.

Ein zweites Teilintegral ergibt sich aus der auf:

$$0 = R' \cdot I_{1t} + L' \cdot \frac{dI_{1t}}{dt} \dots \dots \dots (14b)$$

vereinfachten Gl. (14a). Die Vereinfachung entspricht dem Fall des sich selbst überlassenen Stromkreises der Abb. 11, sie muß also den Kurzschlußausgleichstrom liefern. Dieser vorübergehende Kurzschlußanteilstrom ergibt sich aus Gl. (14b) zu:

$$I''_{1t} = A \cdot e^{-\frac{R'}{L'} \cdot t} \dots \dots \dots (19)$$

wobei A eine Integrationskonstante ist.

Folgt der Kurzschluß dem Leerlauf, was man voraussetzen kann, um den schlimmsten Fall nicht unbeachtet zu lassen, so muß natürlich der Gesamtkurzschlußstrom mit der Stärke Null ein-

setzen. Stromstärkensprünge sind unmöglich. Aus (17) und (19) erhält man dann:

$$J_{1t} = I'_{1t} + I''_{2t}$$

$$\frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\sqrt{R'^2 + (\omega L')^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{R'}{L'} \cdot t} = 0,$$

$$t = 0,$$

d. h.

$$A = -\frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\sqrt{R'^2 + (\omega L')^2}} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \dots \dots \dots (20)$$

und schließlich:

$$I_{1t} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\sqrt{R'^2 + (\omega L')^2}} \cdot \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R'}{L'} \cdot t} \right]. \quad (21)$$

Nebestehende Abb. 12 veranschaulicht den Verlauf des dauernden, des vorübergehenden und des Gesamtkurzschlußstroms. Sie läßt erkennen, daß der Ausgleichsstrom mit der gleichen Stärke, aber mit der entgegengesetzten Richtung einsetzt wie der Dauerstrom, daß er sich um den Schwingungsrhythmus der aufgedrückten Spannung nicht kümmert, daß er seine Richtung beibehält, seine Stärke jedoch allmählich verliert. Man spricht mit einigem Recht

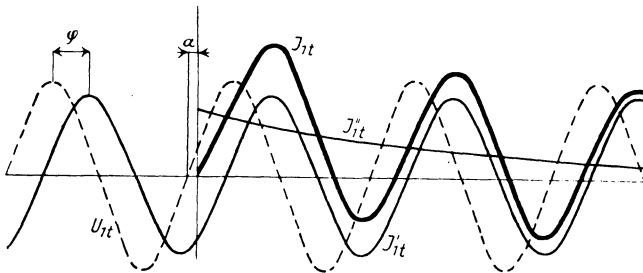


Abb. 12

von der Gleichstromkomponente des Kurzschlußstroms, wenn man ihn im Auge hat.

Mit welcher Stärke der Kurzschlußausgleichsstrom auftritt, um allmählich zu verklingen, hängt vom Augenblick des Kurzschluß-eintritts ab. Am stärksten wird der Ausgleichsstrom, wenn:

$$\alpha - \varphi = \frac{\pi}{2} \dots \dots \dots (22)$$

oder ein ganzes ungerades Vielfaches von $\pi/2$ wird, wie Gl. (21) zeigt. Im Augenblick des Kurzschlußeintritts, $t = 0$, hat dann die aufgedrückte Spannung nach Gl. (10) die Höhe:

$$U_{1t} = \sqrt{2} \cdot U_1 \sin \alpha.$$

Der Augenblickswert:

$$U_{1t} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi \dots (23)$$

verspricht somit den stärksten Kurzschlußausgleichsstrom.

Je stärker der Blindwiderstand den Wirkwiderstand der Transformatorwicklung überwiegt, um so kritischer sind kleine Augenblickswerte der aufgedrückten Spannung beim Kurzschlußeintritt. Bei Vernachlässigung des Wirkwiderstandes käme man so auf den Spannungsnulldurchgang als kritischsten Kurzschlußfall.

Warum ist uns nun ein starker Kurzschlußausgleichsstrom unangenehm? Weil er seine Richtung beibehält. Anfänglich den Kurzschlußdauerstrom schwächend, stärkt er ihn, sobald jener als Wechselstrom seine Richtung ändert. So müssen sich Kurzschlußgesamtstromstärken ergeben, die die Höchststärke des Kurzschlußdauerstroms erheblich übersteigen.

Der ungünstigste, der Gl. (22) entsprechende Kurzschlußfall läßt, wie leicht ersichtlich, den Dauerstrom mit seiner Höchststärke einsetzen. Eine halbe Periode später ist diese Höchststärke wieder da, die Richtung des Dauerstroms stimmt dagegen dann mit der Ausgleichsstromrichtung überein. Hätte während dieser ersten halben Kurzschlußperiode der Ausgleichsstrom nichts an seiner Stärke verloren, so hätte man die doppelte Höchststärke des Dauerstroms als Höchststärke des Gesamtstroms vor sich.

Diese Möglichkeit muß nachdenklich stimmen. Im 6. Abschnitt sahen wir das Quadrat der Augenblicksstromdichte für die Zugspannung der Stromkraft im Kupfer maßgebend. Wir waren auf eine Verzehnfachung der normalen Stromdichte im dauernden Kurzschluß gefaßt. Von der normalen effektiven Stromdichte von 4 A/mm^2 kamen wir so zur Höchstdichte des dauernden Kurzschlusses:

$$4 \cdot 10 \cdot \sqrt{2} \cdot 56 \text{ A/mm}^2.$$

Nun sehen wir, daß die Rechnung noch weiter geht, daß die höchste Gesamtstromdichte des Kurzschlusses noch viel höher, im äußersten

Falle in doppelter Höhe, liegt. So kommen wir über 100 A/mm^2 , auf eine Dichte, die wir gefährlich fanden und wissen dabei nicht einmal, ob nicht der Kurzschluß die normale Stromdichte mehr als verzehnfacht.

Unwillkürlich blickt man auf das Abklingungsgesetz des Kurzschlußausgleichsstroms. Es ist ein bekanntes Gesetz. Bekannt ist auch sein Hilfsbegriff der sogenannten Zeitkonstanten:

$$T = \frac{L'}{R'} \text{ Sekunden} \dots \dots \dots (24)$$

Man weiß, daß nach $4,6 T$ Sekunden nur noch ein Hundertstel der nach ihm abklingenden Größe vorhanden ist. Deshalb muß man ein desto langsames Absterben des unangenehmen Ausgleichsstroms erwarten, je mehr der Blindwiderstand der Transformatorwicklung ihren Wirkwiderstand überwiegt.

Aus Gl. (21) ersieht man nachträglich, daß die Wicklungswiderstände je für sich und gemeinsam einen gewaltigen Einfluß auf die Stärke des Kurzschlußstroms ausüben. Nicht nur die relative Größe dieser Widerstände greift demnach entscheidend ins Kurzschlußproblem ein, sondern auch die absolute. So entpuppen sich die Wicklungswiderstände, einzeln, vereint und aufeinander bezogen, als die Hauptgrößen des Kurzschlußproblems des Transformators. Man kann an ihnen nicht vorbeigehen, ohne sie genau unter die Lupe zu nehmen.

10. Spannungsabfälle des Transformators. Kurzschlußspannung

Im normalen Betrieb machen sich die Wicklungswiderstände durch Spannungsabfälle bemerkbar. An den Sekundärklemmen gibt der belastete Transformator nicht die volle Spannung:

$$U_1 \cdot \frac{w_2}{w_1},$$

die man nach dem Transformationsgesetz erwarten müßte, sondern etwas weniger.

Das Vektorenschaubild der Abb. 13 zeigt, den Leerlaufstrom vernachlässigend, wie sich primär die Widerstandsspannungen $J_1 R_1$ und $J_1 X_1$ zwischen die aufgedrückte Spannung U_1 und die vom

Hauptkraftfluß induzierte Wicklungsgegenspannung E_1 schieben und wie anderseits die transformierte Spannung:

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

an den Sekundärklemmen, um die Widerstandsspannungen $J_2 R_2$ und $J_2 X_2$ geschwächt, als eigentliche Sekundärklemmenspannung U_2 zum Vorschein kommt.

Das durch die Vernachlässigung des Leerlaufstroms vereinfachte Arbeitsschaubild des Transformators ist sehr belehrend. Es zeigt

vor allem, daß dieselbe Sekundärklemmenspannung U_2 herauskommen würde, wenn primär die Wicklungsgegenspannung ganz allein der aufgedrückten Spannung das Gleichgewicht halten müßte, d. h. wenn $E_1 = U_1$ würde, wenn nur die primären Spannungsabfälle, transformiert, d. h. in der richtigen Größe:

$$I_1 \cdot R_1 \cdot \frac{w_2}{w_1} \text{ bzw. } I_1 \cdot X_1 \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

sekundär den eigentlichen Sekundärspannungsabfällen zur Seite treten würden.

Die sekundäre, vom Hauptkraftfluß induzierte Wicklungsspannung wäre in diesem Falle natürlich:

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{w_2}{w_1} = U_1 \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

und der Transformator hätte nur sekundäre Widerstandsspannungen:

$$I_2 \cdot R_2 + I_1 \cdot R_1 \cdot \frac{w_2}{w_1} \text{ bzw. } I_2 \cdot X_2 + I_1 \cdot X_1 \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

Immer, bei jeder Belastung gilt nun das Gesetz des magnetischen Gleichgewichts der

Belastungsströme, die doch den Hauptkraftfluß nicht stören dürfen:

$$I_1 \cdot w_1 = I_2 \cdot w_2$$

Die auf der Sekundärseite zusammengezogenen Gesamtwiderstandsspannungen lassen sich demnach auch durch:

$$I_2 \left[R_2 + R_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \right] = I_2 \cdot R'' \dots \dots \dots (25)$$

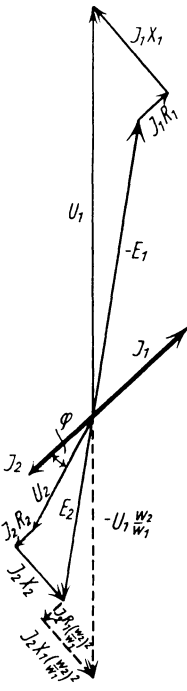


Abb. 13

bzw.

$$I_2 \left[X_2 + X_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \right] = I_2 \cdot X'' \dots \dots \dots (26)$$

ausdrücken.

Ein Vergleich der Gleichungspaare (15), (16a) und (25), (26) zeigt, daß die Wicklungswiderstände für das Außenbild auf der Primär- oder auf der Sekundärseite zusammengezogen werden können. Hätten wir bei der soeben durchgeführten Betrachtung der Wicklungsabfallspannungen den umgekehrten Weg eingeschlagen und die sekundären Widerstandsspannungen primär auftreten lassen, so wären lediglich primär die Gesamtwiderstandsspannungen:

$$I_1 \left[R_1 + R_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right] = I_1 \cdot R'$$

bzw.

$$I_1 \left[X_1 + X_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right] = I_1 \cdot X'$$

zum Vorschein gekommen, ganz im Einklang mit den Gleichungen (15) und (16a).

Diese gut bekannte Übertragbarkeit der Wicklungswiderstände erleichtert die Behandlung der Transformatorenprobleme ungemein. Sie läßt sich auch noch mit Vorteil verwerten, wenn man von den absoluten Abfallspannungen zu den bezogenen übergeht. Man drückt die Größe der Abfallspannungen mit Recht gerne in Hundertsteln der sekundären Klemmenspannung aus, obwohl man dabei eigentlich an die sekundäre Leerlaufklemmenspannung denkt.

Der bezogene Ohmsche Gesamtspannungsabfall beträgt:

$$e_R = 10^2 \cdot \frac{I_2 \cdot R''}{U_2} = \frac{I_2}{U_2} \cdot \left[R_2 + R_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \right] \cdot 10^2 \text{ o.}$$

Nun ist auch:

$$\begin{aligned} e_R &= \frac{I_2^2 \cdot R''}{U_2 \cdot I_2} \cdot 10^2 = \frac{I_2^2}{U_2 \cdot I_2} \cdot \left[R_2 + R_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \right] \cdot 10^2 \\ &= \frac{R_2 \cdot I_2^2 + R_1 \cdot I_1^2}{U_2 \cdot I_2} \cdot 10^2 \text{ o.} \end{aligned}$$

Der bezogene Ohmsche Gesamtspannungsabfall gleicht somit dem Verhältnis der Gesamtstromwärme:

$$V_k = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

zur abgegebenen Scheinleistung:

$$N = U_2 \cdot I_2.$$

Es ist also einfach:

$$e_R = \frac{V_k}{N} \cdot 10^2 = r_k \text{ ‰} \dots \dots \dots (27)$$

Man rechnet bei der Behandlung der Transformatorprobleme nicht gerne mit den Wicklungswiderständen, so wichtig sie auch sein mögen, weil sie wenig über die eigentlichen Eigenschaften des Transformators aussagen und zum Großteil nur die Wicklungsleiter beschreiben. Deshalb ist die Zurückführung des bezogenen Ohmschen Spannungsabfalls auf die bezogene Wicklungsstromwärme außerordentlich willkommen und wichtig. Sie legt es nahe, einen Weg zu suchen, der auch zur Verdrängung des Wicklungsblindwiderstands führt.

Nun ist es klar, daß der Streufluß des Transformators Φ_s die induktiven Abfallspannungen nach genau demselben Gesetz induziert wie der Hauptkraftfluß die Wicklungsgegenspannungen. Zweifellos beträgt somit der induktive Gesamtspannungsabfall:

$$\frac{\Phi_s}{\Phi} \cdot 10^2 \text{ Hundertstel}$$

der primären oder der sekundären Wicklungsgegenspannung.

Will man, was praktisch unausweichlich ist, auch den induktiven Gesamtspannungsabfall auf die sekundäre Klemmenspannung U_2 beziehen, so darf man nicht vergessen, daß diese Klemmenspannung kleiner ist als die sekundäre Wicklungsspannung. Nur wenn man unter Φ jenen Hauptkraftfluß versteht, der in der Sekundärwicklung die Belastungsklemmenspannung induzieren würde, ist der Ausdruck:

$$e_X = \frac{I_2 \cdot X''}{U_2} \cdot 10^2 = \frac{I_2}{U_2} \cdot \left[X_2 + X_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right) \right] \cdot 10^2 = \frac{\Phi_s}{\Phi} \cdot 10^2 \dots \dots (28)$$

einwandfrei. Der Fehler, der sich einschleicht, wenn man in gewohnter Weise für Φ den Leerlaufhauptidekraftfluß einsetzt, ist allerdings praktisch belanglos. Er gleicht ungefähr dem Fehler, den man wie oben angedeutet begeht, wenn man den Ohmschen Spannungsabfall eigentlich auf die sekundäre Leerlaufklemmenspannung bezogen denkt, ihn jedoch auf die Belastungsklemmenspannung U_2 bezieht.

Es liegt nahe, den bezogenen Gesamtspannungsabfall zu:

$$e_K = \sqrt{e_R^2 + e_X^2} = \sqrt{\left(\frac{V_k}{N} \right)^2 + \left(\frac{\Phi_s}{\Phi} \right)^2} \cdot 10^2 \text{ ‰} \dots \dots \dots (29)$$

anzusetzen, weil man an die Phasenverschiebung von 90° der beiden Abfallspannungen gegeneinander denkt. So groß kann der Gesamtspannungsabfall allerdings werden. Er erreicht jedoch diese Größe nur ausnahmsweise.

Aus Abb. 14 ersieht man sofort, daß der Belastungsphasenwinkel φ einen erheblichen Einfluß auf die Größe des Gesamtspannungsabfalls ausübt, weil er entscheidet, wie sich die Gesamtspannungsabfallspannung zur Klemmenspannung U_2 hinzufügt, um die sekundäre Wicklungsspannung E_2 aufzubauen. Es ist in Anbetracht der Kleinheit der Abfallspannungen genau genug anzusetzen:

$$e_K = e_R \cdot \cos \varphi + e_X \cdot \sin \varphi (30)$$

Nur wenn:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{e_X}{e_R}$$

wird, geht Gl. (30) in Gl. (29) über. Dies ist offenbar der ungünstigste Fall, der Fall des größten bei der gegebenen Belastung möglichen Gesamtspannungsabfalls.

Dieser ungünstigste Fall tritt nun, wie Gl. (17) lehrt, im Kurzschluß ein. Im Kurzschluß erreicht aber der bezogene Gesamtspannungsabfall außerdem die äußerste Grenze 100%, weil er die sekundäre Klemmenspannung auf Null herunterdrückt. Aus dieser Tatsache folgt sofort die Erkenntnis, daß der dauernde Kurzschlußstrom I_K den normalen Nennstrom I ebensovielfach überwiegen muß, wie 100 die e_K % nach Gl. (29):

$$I_K = I \cdot \frac{100}{e_K} (31)$$

Dies rechtfertigt den Namen „bezogene Kurzschlußspannung“, auch kurz „Kurzschlußspannung“ für e_K . Es genügen eben e_K % der normalen Primärnetzspannung U_1 , um durch den kurzgeschlossenen Transformator den Nennstrom I als Kurzschlußstrom zu treiben.

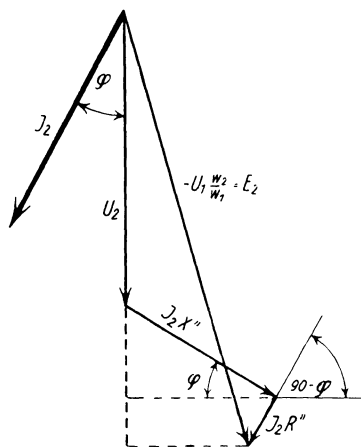


Abb. 14

Es ist leicht einzusehen, daß Gl. (31) im Einklang mit Gl. (17) ist. Macht man sich vom Standpunkt — primär oder sekundär —, von dem aus man den kurzgeschlossenen Transformator betrachtet, frei, schreibt man also für die primär oder sekundär zusammengezogenen Wicklungswiderstände einfach R , ωL statt R' , $\omega L'$ bzw. R'' , $\omega L''$ und für die Klemmenspannung U statt U_1 bzw. U_2 , so erhält man nach Gl. (17) die Effektivstärke des dauernden Kurzschlußstroms zu:

$$I_K = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

oder:

$$\frac{I_K}{I} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R \cdot I}{U}\right)^2 + \left(\frac{\omega L \cdot I}{U}\right)^2}} = \frac{100}{e_K} \dots \dots (31a)$$

11. Kurzschlußproblem und Spannungsabfallproblem

Die vielleicht zum Teil gekünstelt erscheinenden Umformungen des vorangehenden Abschnitts sind für die Kurzschlußtheorie des Transformators außerordentlich wichtig. Sie lassen den aufmerksamen Beobachter erkennen, daß es zwischen dem Kurzschlußproblem, dem Spannungsabfallproblem und dem Wicklungsstromwärmeproblem des Transformators tiefe Zusammenhänge und Beziehungen gibt, die, bloßgelegt, vieles sinnvoll erscheinen lassen, was sonst zufällig entstanden zu sein scheinen muß. Wir wollen diesen Zusammenhängen und Beziehungen nachgehen.

Vor Jahrzehnten, in den ersten Jahren dieses Jahrhunderts, fürchtete man sich sehr, den Gesamtspannungsabfall zu groß werden zu lassen. Die Metallfadenlampen waren für Spannungsschwankungen sehr empfindlich. Es war ungefähr ausgemacht, daß die sekundäre Klemmenspannung vom Leerlauf bis zur Vollast nicht mehr als höchstens um 4 % sinken darf.

Der Ohmsche Teil des Spannungsabfalls wurde immer von den Schwierigkeiten des Stromwärmeproblems niedergehalten. In gemischten Betrieben kam indessen auch der induktive Teil des Spannungsabfalls zum Wort. Erwartete man z. B. einen Leistungsfaktor 0,7, so hatte man in Gl. (30) annähernd:

$$\cos \varphi = \sin \varphi \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

einzusetzen und bekam dann einen Gesamtspannungsabfall von:

$$e_G = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (e_R + e_X) \% \dots \dots \dots (32)$$

Wollte man nun die arithmetische Summe der beiden Teilspannungsabfälle unterhalb der Grenze von 5,65 % halten, gleichzeitig jedoch, in den Kampf mit der Stromwärme verbissen, den Ohmschen Teilspannungsabfall möglichst hoch machen, so mußte man daran gehen, den induktiven Spannungsabfall des noch jungen Transformators mit sorgfältigen Maßregeln zu drücken.

Das war die Zeit der Scheibenspulenwicklungsanordnungen, mit ihren zahlreichen Fronten zwischen den Primär- und den Sekundärspulen, die Zeit ungefähr gleich großer Teilspannungsabfälle und bescheidener Kurzschlußspannungen. Eine Kurzschlußspannung von 3, ja selbst 2 % war damals keine Unmöglichkeit, auch keine seltene Erscheinung. Daß die Kurzschlußströme damals 30- auch 50mal die Vollastströme übertrafen, spielte keine Rolle. Man schaltete sie rasch ab und die Kurzschlußstromkraftgefahren waren fast noch unbekannt.

Die Zeit arbeitete indessen am Spannungsabfallproblem unsichtbar aber beharrlich. Sie trieb den Transformatorenbau in die Richtung wachsender Leistungen. Es ist lehrreich nachzusehen, wie das Wachsen der Leistung auf die Größe des Ohmschen und des induktiven Spannungsabfalls zurückwirkte. Die im vorangehenden Abschnitt bereitgestellte Gl. (29) erweist sich dabei als ein wertvolles Hilfsmittel.

Man kann aus einem gegebenen Transformator eine größere Leistung herausholen, wenn man einfach die Stromdichte im Kupfer oder die Liniendichte im Eisen oder auch beide Dichten gleichzeitig erhöht. Wir wollen zunächst voraussetzen, daß man beide Dichten x -mal größer macht. Dies war in der Frühzeit des Transformatorenbaus wohl möglich, weil man das Kühlungsproblem noch keineswegs beherrschte und deswegen zuweilen nur mäßige Erwärmungen bei den in Aussicht genommenen Leistungen feststellte.

Die x -fache Stromdichte gibt eine x^2 -fache Wicklungsstromwärme. Die x -fache Strom- und die x -fache Liniendichte geben vereint eine x^2 -fache Leistung. Am Ohmschen Teilspannungsabfall ändert sich also dabei, wie Gl. (29) zeigt, nichts.

Der x -mal größeren Wicklungsdurchflutung entspricht natürlich ein x -mal stärkerer Streukraftfluß. Andererseits verstärkt die x -fache

Liniendichte den Hauptkraftfluß x -mal. Auch am induktiven Teilspannungsabfall ändert also, wie aus Gl. (29) ersichtlich, die gleichmäßige Erhöhung beider Dichten nichts.

Früh stieß der junge Transformatorenbau bei seinen Versuchen, die Liniendichte hochzutreiben, auf den bedrohlich anschwellenden Magnetisierungsstrom. Er blieb deshalb bei Dichten von 13000 bis 14000 Gauß stecken. Von da an warf er sich mit doppeltem Eifer auf die Stromdichte allein.

Was kommt nun heraus, wenn man die Stromdichte allein erhöht, um die Leistung größer werden zu lassen? Gl. (29) darüber befragt, sagt aus, daß dann sowohl der Ohmsche als auch der induktive Spannungsabfall steigt, beide in demselben Verhältnis wie die Stromdichte.

Es gibt noch einen anderen, naheliegenden Weg zu höheren Leistungen. Man kann die elektromagnetischen Beanspruchungen des Eisens und des Kupfers ungeändert lassen und alle Abmessungen, sagen wir x -mal, vergrößern. Dann wird der Wicklungsleiterquerschnitt ebenso x^2 -mal größer wie der Eisenkernquerschnitt. Das gibt einen x^2 -fachen Nennstrom und eine x^2 -fache Nennspannung, d. h. eine x^4 -mal größere Leistung.

Das gibt andererseits ein x^3 -mal größeres Wicklungskupfergewicht, folglich eine x^3 -mal größere Wicklungsstromwärme. Nach Gl. (29) wird somit der Ohmsche Spannungsabfall x -mal kleiner, er nimmt mit der vierten Wurzel aus der wachsenden Leistung ab.

Der x^2 -mal größere Nennstrom erregt natürlich den Streukraftfluß x^2 -mal stärker. Dazu bekommt der Streukraftfluß einen x^2 -mal größeren Durchtrittsquerschnitt. Allerdings werden gleichzeitig auch seine Kraftlinien x -mal länger. Im ganzen ergibt sich also eine x^3 -fache Verstärkung des Streukraftflusses, während der Hauptkraftfluß nur x^2 -mal stärker geworden ist. Nach Gl. (29) wird so der induktive Spannungsabfall x -mal größer, er wächst mit der vierten Wurzel aus der wachsenden Leistung.

Es gab zweifellos zu allen Zeiten Leistungssteigerungsversuche, die auf allen drei hier beschriebenen Wegen gleichzeitig vordrangen. Der reifende Transformatorenbau beschränkte sich jedoch mehr und mehr auf den zuletzt beschriebenen Weg. Deshalb sehen wir seit Jahrzehnten den Ohmschen Spannungsabfall mehr und mehr hinter den induktiven zurücktreten.

Die Verhältnisse der Teilspannungsabfälle, die uns heute bei großen Transformatoren entgegentreten, 8:1, 10:1, selbst 12:1, zugunsten des induktiven Abfalls, sind trotzdem nicht das ausschließliche Ergebnis des Leistungswachstums. Der Transformatorenbau hat die Entwicklung künstlich gefördert. Er hat knapp vor dem Weltkrieg plötzlich das Steuer umgeworfen und den bis dahin niedergehaltenen induktiven Spannungsabfall unvermittelt hochgehoben.

Warum? Er erschrak vor der Kurzschlußstromkraft, die mit den überraschend auftretenden ersten Großtransformatoren unvermutet auftauchte. Er begann, sich vor großen Kurzschlußstromstärken zu fürchten. Er versuchte, sich mit künstlich aufgeblähten Kurzschlußspannungen zu wehren. Und da er dabei mit dem Ohmschen Spannungsabfall nichts anfangen konnte, setzte er alle seine Hoffnungen auf den induktiven. Der induktive Spannungsabfall konnte ihm plötzlich nicht groß genug werden.

Der Ohmsche Spannungsabfall läßt sich in der Tat nicht in den Kampf mit den Kurzschlußstromkräften einspannen. Ihn vergrößern, heißt die Wicklungsstromwärme vergrößern (Gl. 27), heißt die Kühleinrichtung verteuern, heißt die Verlustenergiekosten der Transformation erhöhen.

Die Vergrößerung des induktiven Spannungsabfalls verursacht keine zusätzlichen Energieverluste, erschwert die Kühlung in keiner Weise, kostet also so gut wie nichts. Es ist kein Wunder, daß der induktive Spannungsabfall die Hauptwaffe des Kampfes mit den Kurzschlußstromkräften geworden ist. Es ist auch kein Wunder, daß heute bei sehr großen Transformatoren der bezogene induktive Spannungsabfall praktisch die bezogene Kurzschlußspannung bedeutet.

Unwillkürlich greifen wir auf Gl. (9), die uns die Kurzschlußstromkraftgefahr so gut beschreibt, zurück. Wächst nicht bei x -facher Vergrößerung aller Abmessungen des Transformators, die bei unveränderter Strom- und Liniendichte die x^4 -fache Leistung verspricht, das Kupfergewicht G_k wie x^3 , die Säulenlänge h dagegen nur wie x ? Muß denn nicht die Zugspannung im Wicklungskupfer, verursacht durch die Kurzschlußstromkraft, mit der Quadratwurzel aus der Leistung zunehmen, wenn die Höchststromdichte im gefährlichsten Kurzschlußaugenblick bei wachsender Leistung unverändert bleibt?

Dem Kupfer des großen Transformators kann man natürlich keine höheren mechanischen Beanspruchungen zumuten als dem Kupfer der kleinen Einheit. Will man also wirklich das Wicklungskupfer mechanisch mitwirken lassen, so bleibt nur ein Ausweg: Die Höchstdichte des Kurzschlußstroms muß mit der vierten Wurzel aus der wachsenden Leistung abnehmen.

Der Ausweg ist zugänglich. Wir haben gesehen, daß der induktive Spannungsabfall von selbst mit der vierten Wurzel aus der Leistung wächst. Hat neben ihm der Ohmsche Spannungsabfall nichts zu sagen, so wächst die Kurzschlußspannung ebenso. Deshalb wird entsprechend das Verhältnis des Dauerkurzschlußstroms zum Nennstrom kleiner; kurz, die Höchstdichte des Kurzschlußstroms, des dauernden wenigstens, wird tatsächlich in dem gewünschten Ausmaß schwächer.

Es ist keine reine Freude, die Kurzschlußstromkraftgefahren auf diese Weise beschworen zu sehen. Der bezahlte Preis ist hoch: Der Gesamtspannungsabfall ist zwischendurch unerträglich geworden. Große Transformatoren haben Kurzschlußspannungen von 10, auch 12 %. Kleiner, aber doch furchtbar störend wird somit der Unterschied zwischen der Leerlaufs- und der Vollastsekundärklemmenspannung.

12. Anzapfungen. Der regelbare Transformator

An und für sich ist der Spannungsabfall des Transformators scheinbar eine belanglose Erscheinung. Daß die sekundäre Klemmenspannung mehr als im Verhältnis der sekundären Windungszahl zur primären kleiner wird als die Spannung des Primärnetzes, ist zunächst nur eine Entstellung des schönen Transformationsgesetzes, das man eigentlich verwirklicht sehen will. Man könnte sich mit ihr leicht abfinden und eben das Übersetzungsverhältnis passend einstellen, um doch die angestrebte Sekundärklemmenspannung zu erhalten.

Das wirkliche Unglück ist die Abhängigkeit des Spannungsabfalles von der Belastungshöhe und auch von der Größe des Leistungsfaktors. Der lebendige Betrieb verursacht unaufhörliche Belastungs- und Leistungsfaktorschwankungen. Der lästige Spannungsabfall läßt sich also nur mit fortwährenden Änderungen des Übersetzungsverhältnisses wirklich durchgreifend bekämpfen.

Das ist der Kern des Spannungsabfallproblems. Wohl wissend, daß es unmöglich ist, während des Betriebes in gut eingewickelte

Spulen des Transformators hineinzugreifen und einzelne Windungen ab- oder zuzuschalten, wählte der junge Transformatorbau den Weg, den er wählen mußte: Er beschränkte den Gesamtspannungsabfall des Transformators so ausgiebig, daß die Metallfadenlampe, an den voll belasteten Transformator angehängt, praktisch ebenso gut leuchtete wie als einziger Stromabnehmer.

Im Laufe der Zeit gewann indessen die Idee, Windungen ab- oder zuzuschalten, die Idee, das Übersetzungsverhältnis zu ändern, um lästige Spannungsabfälle bekämpfen zu können, doch eine greifbare Gestalt. Um nicht in sorgfältig isolierte Spulen hineingreifen zu müssen, fing man an, schon in der Werkstätte einige Windungen von außen zugänglich zu machen. So entstanden die sogenannten Anzapfungen an den Wicklungsenden des Transformators.

Man kann nicht behaupten, daß die Anzapfungen lediglich den Spannungsabfall des Transformators im Auge gehabt hätten. Sie waren als Hilfsmittel gegen zu empfindliche Spannungsschwankungen schlechtweg gedacht, galten also auch dem Netz selbst. Es ist indessen doch unverkennbar, daß es um so mehr Anzapfungen an Transformatoren gab, je mehr sich unter dem Druck des Kurzschlußstromkraftproblems das Spannungsabfallproblem des Transformators zuspitzte.

Die Anzapfungen bedeuteten einen unbeholfenen Eingriff ins Übersetzungsverhältnis; sie waren gewiß besser als nichts, konnten indessen den Belastungs- und Leistungsfaktorschwankungen der arbeitenden Netze nur umständlich folgen. Sie verlangten jedesmal, wenn sie in geänderter Form eingreifen sollten, das Abschalten des Transformators. Sie verursachten sogar empfindliche Betriebsunterbrechungen des Transformators und erzwangen so praktisch nur seltene Änderungen des Übersetzungsverhältnisses.

Mit den Anzapfungen zog immerhin die Regelbarkeit der sekundären Klemmenspannung in den Transformatorenbau ein. Gewiß war es nur eine Regelbarkeit für lange Einstellzeiten. Es war eine Regelbarkeit mit groben Spannungs- und Zeitstufen. Trotzdem bedeutete sie den Beginn eines Kampfes, des offenen Kampfes mit dem Spannungsabfall des Transformators.

Es war kein Zufall, daß vor etwa anderthalb Jahrzehnten die Anzapfungsidee einen mächtigen Vorstoß unternahm. Seit dem Weltkriegsausbruch trieb die Angst vor den Kurzschlußstromkräften die Kurzschlußspannungen großer Transformatoren unaufhörlich in die Höhe, insofern sie nicht von selbst wuchsen. Sie trieb auch bei den

mittleren und kleineren Leistungen die Kurzschlußspannungen, mit ihnen aber auch die Spannungsabfälle vorwärts. Irgend etwas mußte geschehen. Mit den unbeholfenen Anzapfungen kam man nicht mehr aus.

Da kam aus Amerika die Kunde, daß es gelungen sei, Windungen ohne Betriebsunterbrechung ab- oder zuzuschalten. Bewahrheitete sie sich, so war das Ende der Spannungsabfallschwierigkeiten erreicht. Der Kampf mit den Kurzschlüssen war dann seines mächtigen Hemmschuhs befreit.

Es ist bekannt, daß es wirklich gelang, mit den beim Umschalten der Anzapfungen im vollen Betrieb auftretenden Windungskurzschlüssen fertig zu werden, daß man allmählich die Kinderkrankheiten der neuen Regeleinrichtung überwand, daß man kühner und kühner wurde, beharrlich den Regelbereich erweiterte und in mühsamer Arbeit auf feinere und feinere Regelabstufungen kam.

Heute ist der Transformator regelbar wie eine Maschine. Ja er leistet mit seiner Regeleinrichtung mehr. Ein Regelbereich von 30 % macht ihm keine Schwierigkeiten mehr. Der Kampf des Transformators mit dem Spannungsabfall hat längst die Grenzen des Transformatorbaus überschritten. Das, was der Stromerzeuger im Kampf mit den Spannungsabfällen des Netzes nicht mehr bewältigen kann, das was die Fernleitungen neben den Wicklungswiderständen des Transformators verschulden, nimmt heute die Regeleinrichtung des Transformators auf sich.

Man trifft sie heute bei großen und bei kleinen Transformatoren an. Sie hat eigentlich nur einen Fehler: Sie ist teuer, sie kann gut ein Drittel der Baukosten des Transformators verursachen. Dies stimmt nachdenklich. Transformatorenkurzschlüsse sind vielleicht doch ernstere Betriebserscheinungen als man glaubt.

Es liegt noch ein Schatten auf dem scheinbar so erfolgreichen Kampf mit den Kurzschlußströmen des Transformators, obwohl ihm heute die Kurzschlußspannung als Waffe ohne Vorbehalte zur Verfügung steht. Es ist nämlich nicht wahr, daß die Kurzschlußstromstärke einfach der gewählten Kurzschlußspannung umgekehrt proportional ist.

Die effektive Stärke des dauernden Kurzschlußstroms ist allerdings der Kurzschlußspannung umgekehrt proportional, die Gl. (31) ist einwandfrei. Dasselbe gilt natürlich auch von der Höchststärke des dauernden Kurzschlußstroms. Die Höchststärke des Gesamt-

kurzschlußstroms liegt jedoch im ungünstigsten Kurzschlußfall nicht immer in derselben Höhe über der Höchststärke des Dauerkurzschlußstroms. Sie kann in doppelter, in $1\frac{1}{2}$ facher Höhe liegen, sie kann nur ganz wenig hervortreten.

Rechnet man aus Angst einfach mit der doppelten Höchststärke des Dauerkurzschlußstroms, wenn man an Hand der Gl. (9) den Stromkraftgefahren nachspürt, dann gibt es allerdings keine Verwicklungen mehr. Will man jedoch unbefangen feststellen, was mit einer etwaigen Vergrößerung des induktiven Spannungsabfalls noch erreicht werden kann, dann hat man noch ein Problem vor sich. Wir wollen es kurz erledigen.

Im 8. Abschnitt stellten wir fest, daß eine halbe Periode nach dem Eintritt des ungünstigsten Kurzschlußfalles die Höchststärke des Gesamtkurzschlußstroms zu erwarten ist. Dies gilt genau, wenn der Kurzschlußausgleichsstrom während dieser ersten halben Kurzschlußperiode nichts an seiner Stärke verliert. Es gilt mit vollkommen genügender Genauigkeit auch dann, wenn der Kurzschlußausgleichsstrom verhältnismäßig rasch dahinschwindet.

Wie groß ist also die kritische Höchststärke des Gesamtkurzschlußstroms? Gl. (21) beantwortet diese Frage sofort, wenn man:

$$\alpha - \varphi = \frac{\pi}{2} \quad \text{und} \quad \omega t = \pi$$

setzt, womit einerseits der ungünstigste Kurzschlußfall und andererseits der kritische Augenblick berücksichtigt ist. Es ist, mit I als (primärem oder sekundärem) Nennstrom, der (primäre oder sekundäre) Kurzschlußhöchststrom:

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I \cdot \frac{100}{e_X} \left[1 + e^{-\frac{R}{\omega \cdot L} \cdot \pi} \right] \dots \dots \dots (21a)$$

Wenn nun der Ohmsche Spannungsabfall dem Kampf mit der Höchststärke des Kurzschlußstroms fernbleiben muß, kann das Verhältnis der Teilspannungsabfälle:

$$\xi = \frac{e_K}{e_R} = \frac{\omega \cdot L}{R} \dots \dots \dots (33)$$

als Waffe betrachtet werden. So entsteht der Ausdruck:

$$\frac{I_{\max}}{\sqrt{2} \cdot I} = \frac{100}{e_R} \cdot \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{\xi}}}{\sqrt{1 + \xi^2}} \dots \dots \dots (34)$$

dem man leicht ablesen kann, daß die zunächst erwarteten Vorteile der Kurzschlußspannungserhöhungen zum Teil wieder verlorengehen.

In alten Zeiten, als der induktive Spannungsabfall noch ungefähr dem Ohmschen gleich war, überragte der Höchstwert des Gesamtkurzschlußstroms den Höchstwert des Dauerkurzschlußstroms nur um einige wenige Hundertstel. Der Kurzschlußausgleichsstrom war damals außerordentlich kurzlebig. Damals kam jede Erhöhung des induktiven Spannungsabfalles fast voll zur Geltung.

Heute sind wir der Verdoppelung der Höchststärke des Dauerkurzschlußstroms am Ende der ersten Halbperiode des ungünstigsten Kurzschlußfalles bedenklich nahe. Der Weg von $\xi = 1$ bis $\xi = 10$

ist nicht so glatt, wie er dem oberflächlichen Beobachter erscheint.

Nebstehende Abb. 15 zeigt den Verlauf des Einflusses der beiden Funktionen:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} \quad \text{und} \quad \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2}\xi}}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

auf diesem Wege. Sie enthält auch das Bild des Gesamtspannungsabfalles entsprechend Gl. (32).

Der Eindruck, daß die Kurzschlußspannung all-

mählich eine ziemlich stumpfe Waffe geworden ist, kann schwer unterdrückt werden. Dieser Eindruck wird durch das sichtbar ungeschwächte Steigen des Gesamtspannungsabfalles unterstrichen. Nähern wir uns nicht zusehends einer Grenze, die einen rechtzeitigen Richtungswechsel empfiehlt?

Es wird sehr bald keinen vernünftigen Sinn mehr haben, die Kurzschlußspannung noch größer werden zu lassen. Bei sehr großen Transformatoren wird man anfangen müssen, sie zu drücken. Von der einfachen Zylinderwicklung wird man zur unterteilten Zylinderwicklung übergehen müssen. Ein alter Weg, bekannt noch aus den Zeiten der Scheibenspulenwicklungsanordnung, steht dem ganz großen Transformator offen.

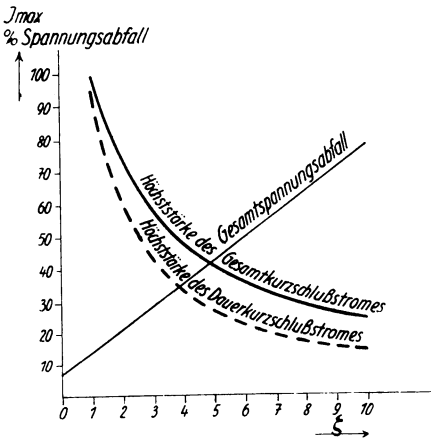


Abb. 15

13. Kurzschlußstromwärme. Größenordnung der Kurzschlußstreu­feldenergie

Die Aufmerksamkeit, die bisher der Höchststärke des Gesamt­kurzschlußstroms geschenkt wurde, war in unverkennbarer Weise in der Gleichung (9), d. h. in der Angst vor unzulässigen, von der Kurzschlußstromkraft im Wicklungskupfer heraufbeschworenen Zug­spannungen verankert. Sie wurde im Laufe der Untersuchungen kein einziges Mal mit der Sorge, die Kurzschlußstromwärme könnte bei allzu hohen Höchstdichten des Gesamtkurzschlußstroms alle Dämme niederreißen, begründet.

Folgt denn die Stromwärme nicht ebenso dem Quadrat der Stromdichte wie die Stromkraft? Ist das Kurzschlußstromwärme­problem wirklich weniger wichtig als das Kurzschlußstromkraft­problem? Gibt es stichhaltige Gründe dafür, daß man von der höch­sten Höhe der Kurzschlußerscheinung vor allem nach der Strom­kraftseite blickt?

Es gibt in der Tat triftige Gründe für diese scheinbar ungerechte Unterscheidung. Die soeben gestellten Fragen stoßen sogar tief in den bis heute noch wenig durchforschten Hintergrund des Kurz­schlußsicherheitsproblems. Man tut gut, ein wenig bei ihnen zu ver­weilen.

Was sieht man denn eigentlich, wenn man im Augenblick der höchsten Stromdichte des Gesamtkurzschlußstroms nach den beiden Seiten der Kurzschlußerscheinung blickt? In der einen Richtung eine Leistung, die sekundliche Stromwärmemenge. In der anderen Richtung eine Kraft, die Zugspannung im Wicklungskupfer. Die Leistung drückt die Geschwindigkeit, mit der sich die Wärme im Kupfer auftürmt, aus. Hinter ihr sieht man, ob man will oder nicht, die Zeit, die Dauer des Kurzschlusses. Die Kraft, die Zug­spannung im Kupfer, hat mit der Zeit nichts zu tun. Das Kupfer ist ihr gewachsen oder es gibt ihr nach. Deshalb und nur deshalb ist der Kurzschlußtheorie des Transformators das Stromkraftproblem im kritischen Kurzschlußaugenblick wichtiger als das Strom­wärmeproblem.

So gut begründet der soeben beschriebene Standpunkt auch er­scheinen mag, ist er doch der Standpunkt einer veralteten, einer überlebten Kurzschlußtheorie des Transformators. Man muß, wie es der Verfasser nachgewiesen hat, andere Augengläser aufsetzen, wenn

man ins Dunkel der Abgründe der Transformator Kurzschlüsse eindringen will. Der alte Standpunkt soll hier trotzdem noch eine Weile beibehalten werden. Er gestattet eine bequeme Beantwortung einiger grundlegender Fragen.

Vor allem: Wie steht es mit der Kurzschlußstromwärme? Ist sie stark von der Mitwirkung des Kurzschlußausgleichsstroms abhängig? Begeht man einen gefährlichen Fehler, wenn man nur die Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms berücksichtigt, d. h. den Ausgleichskurzschlußstrom einfach vernachlässigt?

Der überängstliche Standpunkt, den Ausgleichskurzschlußstrom als wirklichen Gleichstrom anzusehen, sein Dahinschwinden nicht zu beachten, führt zu erschreckenden Folgerungen. Der ständige Kurzschlußgleichstrom ist in diesem Falle sozusagen eine „Unterwelle“ des Dauerkurzschlußstroms, er entwickelt seine eigene Stromwärme in voller Unabhängigkeit. Ebenso stark wie der Dauerkurzschlußstrom auf seiner höchsten Höhe — wenn es das Unglück will —, muß er als Gleichstrom die doppelte Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms entwickeln. Die Angst malt somit im ungünstigsten Kurzschlußfalle die dreifache Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms an die Wand.

Wir sahen indessen im vorangehenden Abschnitt, daß es Kurzschlußausgleichsströme gab, die bereits nach der ersten Halbperiode des Kurzschlusses auf einige wenige Hundertstel ihrer ursprünglichen Stärke dahingeschwunden waren. Sie waren im jungen Transformatorbau zu Hause, sie gehören der Zeit kleiner induktiven Spannungsabfälle an. Ihr Leben war praktisch in der ersten Kurzschlußperiode ausgelebt. Ihr Einfluß auf die Kurzschlußstromwärme war bedeutungslos. Selbst wenn der Kurzschluß nur eine Sekunde dauert, umfaßt er normalerweise 50 Perioden. Ob die erste dieser 50 Perioden den Kurzschlußausgleichsstrom in der möglichen Weise mitwärmen läßt oder nicht, ist praktisch gleichgültig.

Das immer stärkere Hervortreten des induktiven Spannungsabfalles zog, wie wir gesehen haben, das Leben des Kurzschlußausgleichsstroms immer mehr in die Länge. Der Transformatorbau entfernt sich mehr und mehr von der unteren, günstigsten Grenze, die der Stromwärme des Gesamtkurzschlußstroms gezogen ist, d. h. von der unverstärkten Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms.

Heute spürt man den Kurzschlußausgleichsstrom noch in der fünften, auch noch in der sechsten, zuweilen selbst in der siebenten

Kurzschlußperiode. Andererseits versucht man es heute mehr und mehr, die Kurzschlußdauer zu kürzen. Die Frage, ob heute der Kurzschlußausgleichsstrom im Stromwärmeproblem noch vernachlässigbar ist, muß gestellt werden. Daß wir weit davon entfernt sind, die obere, ungünstigste Grenze, die wir oben der Stromwärme des Gesamtkurzschlußstroms gezogen haben, jemals zu erreichen, liegt auf der Hand.

Wir greifen auf Gl. (21) zurück, machen uns wieder von der Unterscheidung der primären und sekundären Größen frei, bezeichnen einfach mit I_t den Augenblickswert des Kurzschlußgesamtstroms, mit I_k die Effektivstärke des Dauerkurzschlußstroms, mit R den Gesamtwirkwiderstand, mit ωL den Gesamtblindwiderstand der Wicklung, schreiben also:

$$I_t = \sqrt{2} \cdot I_k \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \right]$$

und setzen die Kurzschlußstromwärme zu:

$$W = \int_0^{T_k} I_t^2 \cdot R \cdot dt$$

an, wobei T_k die Kurzschlußdauer in Sekunden bedeutet.

Umfaßt T_k eine so große Anzahl von ganzen Perioden — diese Einschränkung des Integrationsbereichs ist praktisch erlaubt und empfehlenswert — daß man ein restloses Ausklingen des Ausgleichsstroms voraussetzen darf, so erhält man:

$$W = I_k^2 \cdot R \cdot T_k + \left[\sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(\alpha - \varphi) \right]^2 \cdot \frac{L}{2} - (\sqrt{2} \cdot I_k)^2 \cdot L \cdot 2 \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \dots \dots (35)$$

Der etwas undurchsichtige Ausdruck der Gl. (35) gestattet im Sonderfall:

$$\alpha = 0,$$

der dem Nulldurchgang der dem Transformator aufgedrückten Spannung im Augenblick des Kurzschlußeintritts entspricht, eine klare Deutung. Er vereinfacht sich auf:

$$W = I_k^2 \cdot R \cdot T_k + (\sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin \varphi)^2 \cdot \frac{L}{2}$$

und setzt sich offenbar aus dem Ausdruck für die Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms und aus dem Ausdruck für die magnetische

Energie des Kurzschlußausgleichsstroms im Kurzschlußeintritts-
augenblick zusammen.

Es ist klar: Der Kurzschlußausgleichsstrom wandelt seine ur-
sprüngliche magnetische Energie allmählich in Stromwärme um, wie es
jeder verklingende, sich selbst überlassene Strom tut. Diese Tatsache
lenkt die Aufmerksamkeit auf die Streufeldenergie des Transformators.

Folgender Vergleich ist ungemein belehrend. Der Dauerkurz-
schlußstrom speichert beim Aufstieg zu seiner Höchststärke, $\sqrt{2} \cdot I_k$,
im Streufeld des Transformators die Energiemenge:

$$(\sqrt{2} I_k)^2 \cdot \frac{L}{2} = I_k^2 \cdot L \quad \text{Wattsekunden}$$

auf. Dies macht er in jeder Kurzschlußperiode zweimal. Andererseits
erzeugt er in jeder Kurzschlußperiode:

$$\frac{I_k^2 \cdot R}{f} \quad \text{Wattsekunden}$$

Stromwärme. Es ist also:

$$\frac{J_k^2 L}{I_k^2 \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\omega \cdot L}{R} \quad \dots \dots \dots (36)$$

d. h. die Streufeldenergie des Dauerkurzschlußstroms hat
die Größenordnung der von ihm in einer Periode er-
zeugten Stromwärme.

Für den Fall des Spannungsnulldurchgangs im Kurzschluß-
eintritts Augenblick ist damit die Bedeutungslosigkeit des möglichen
Stromwärmebeitrags des Kurzschlußausgleichsstroms erwiesen. Man
kann Kurzschlüsse nicht auf eine Periode genau abschalten.

Der allgemeine Fall der Gl. (35) bringt zusätzliche Erscheinungen.
Natürlich bedeutet in Gl. (35) das erste Glied rechts immer noch die
Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms. Ebenso bedeutet, wie man
leicht einsieht, das zweite Glied immer noch die anfängliche magne-
tische Energie des Ausgleichskurzschlußstroms. Nach wie vor ist
dieses zweite Glied praktisch bedeutungslos. Das Restglied kann
merkwürdigerweise positiv und negativ werden.

Der negative Höchstwert dieses Restgliedes kann allein eine prak-
tische Bedeutung erlangen. Er stellt sich ein, wenn:

$$\alpha = \frac{\pi + \varphi}{2}$$

wird und beträgt:

$$- (\sqrt{2} \cdot I_k)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot 4 \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \varphi \text{ Wattsekunden}$$

und hat jedenfalls die Größenordnung des zweiten Gliedes der Gl. (35). Bei $\varphi = 60^\circ$ z. B. erreicht er dessen $1\frac{1}{2}$ fache Größe. Wir haben indessen heute bereits so große Kurzschlußphasenwinkel, daß das störende Restglied der Gl. (35) keine Bedeutung mehr erlangen kann.

So ist es endlich klargestellt, daß die Kurzschlußstromwärme der Stromwärme des Dauerkurzschlußstroms ohne Rücksicht auf die steigende Bedeutung des induktiven Spannungsabfalls bei der Behandlung aller Fragen des Kurzschlußstromwärmeproblems des Transformators gleichgesetzt werden darf.

14. Energiebewegung im Kurzschluß

Die Untersuchungen des vorangehenden Abschnitts führen zu einem vereinfachten, deshalb klaren, allerdings noch einseitigen Bild des Transformator Kurzschlusses: Gleichmäßig fließt, vom Kurzschluß eintritt an, der mächtige Kurzschlußwärmestrom ins Wicklungskupfer, drohend, die Isolierstoffe zu vernichten. Man hört, an dieses Bild denkend, das verhängnisvolle Ticken der Kurzschlußuhr, sieht die überragende Bedeutung der Kurzschlußdauer, kann aber doch nicht übersehen, daß die Kurzschlußverbrennungsgefahr letzten Endes doch nur in der Energielieferung der Stromquelle während des Kurzschlusses verankert ist.

Versucht man nun, dieses noch einseitige Bild zu ergänzen, blickt man also nach der Stromkraftseite, so muß man sich fragen: Fürchtet man die Zugspannung im Kupfer oder Kupferdehnungen, die Kurzschlußstromkraft oder deren zerstörende Arbeit?

Die Antwort kann nicht zweifelhaft sein. Wir fürchten immer nur Gestaltänderungen des Wicklungskörpers. Wir fürchten merklliche Kupferdehnungen, selbst wenn sie federnd verschwinden, sobald die Stromkraft nachläßt. Wir haben Angst, daß die Stromkraft den Wicklungskörper sprengt.

Es gibt keine Dehnung des Wicklungskörpers, sei sie klein oder groß, federnd oder bleibend, ohne Arbeitsleistung der dehnenden Stromkraft. Das Kurzschlußstromkraftproblem ist kein statisches Problem, obwohl es bisher immer nur von Kräften und Spannungen

sprach. Es ist Zeit, es so zu sehen, wie es wirklich ist: Voll Dynamik, ein Problem mechanischer Arbeitsleistungen, ein Problem unscheinbarer aber gefährlicher Bewegungen. So gesehen, stellt es sofort die verfängliche Frage: Woher kommt die Energie, die den Kurzschlußstromkräften die Gestaltänderungen des Wicklungskörpers ermöglicht?

Die Frage berührt den wunden Punkt der bisherigen Kurzschlußstromkrafttheorie. Sie lenkt ja die Aufmerksamkeit auf die unbestreitbare Tatsache, daß der Dauerkurzschlußstrom großer Transformatoren fast ein Blindstrom ist, daß seine Wirkkomponente offenkundig der Lieferung der Kurzschlußstromwärme entspricht und daß seine Blindkomponente nicht arbeiten kann.

Die Angst vor der Kurzschlußstromwärme ist berechtigt, das Hereinströmen der sengenden Energie aus der Stromquelle in die Wicklung ist sichtbar. Die Angst vor der Kurzschlußstromkraft ist scheinbar unbegründet, man sieht nicht, wie die sprengende Energie aus der Stromquelle heranrückt. Die lediglich drohende Gefahr ist ein Gespenst, nicht mehr.

Wie ist das eigentlich? Verdeckt der Kurzschlußausgleichsstrom die Quelle der Gestaltänderungsenergie? Fürchten wir uns seit Jahrzehnten vor Gespenstern? Gibt es denn keine Sprengungen der Wicklungskörper, keine wirklichen mechanischen Beschädigungen der Transformatoren durch Kurzschlußstromkräfte?

Von möglichen Kurzschlußsprengungen der Transformatoren ist viel, allzuviel, gesprochen und geschrieben worden; erlebt hat man keine einzige. Es gab jedoch unzählige Verbiegungen von Transformatorenspulen, Zerrüttungen von Wicklungstragkörpern, Verunstaltungen von Spulenverbindungsleitungen, kurz, es gab mechanische Beschädigungen der Transformatorenwicklungen. In ihren Anfängen war die Angst vor der Kurzschlußstromkraft im Transformatorenbau sicherlich übertrieben. Unbegründet war sie nie. Die Energiebewegung im Kurzschluß des Transformators hat offenbar ihre Geheimnisse.

Beschränken wir nochmals unsere Betrachtungen auf das Arbeiten des dauernden Kurzschlußstroms. Ist es denn wirklich wahr, daß er nur die Kurzschlußstromwärme aus dem Energievorrat des Netzes entnimmt und in das Wicklungskupfer schleppt? Baut er denn nicht in jeder Periode zweimal das Streufeld des Transformators auf, das er mit magnetischer Energie füllt? Entnimmt er nicht

auch die Streufeldenergie dem Netz, allerdings nur vorübergehend, nur um sie immer wieder, ungeschmälert, zurückzubringen?

Es ist unzweifelhaft: Aus der Stromquelle führen in den kurzgeschlossenen Transformator zwei Energiegeleise. Das eine führt ins Unabsehbare. Auf ihm wird unaufhörlich, d. h. solange der Kurzschluß dauert, Energie der Stromquelle entzogen — auf Nimmerwiedersehen. Dies ist das Kurzschlußstromwärmegeleise. Das andere Geleise bildet eine zur Stromquelle zurückkehrende Schleife. Auf ihm kreist eine genau abgemessene Energiemenge, zweimal in jeder Kurzschlußperiode herumlaufend. Dies ist das Geleise der Streufeldenergie des Transformators.

Daß auf dem Kurzschlußstromwärmegeleise nirgends etwas anderes als Stromwärme abgeladen werden kann, ist klar. Die Energie, die den Kurzschlußstromkräften Arbeitsleistungen ermöglichen soll, kann zweifellos nur auf der merkwürdigen Energiegeleiseschleife in den Transformator gelangen. Eine Beschädigung des Schleifengeleises könnte einen Teil der kreisenden Energiemenge festhalten und der Stromquelle rauben.

Dieses Bild, so unvollkommen es auch sein mag, deckt den Zusammenhang der Kurzschlußstromkraftarbeit mit der Kurzschlußstreufeldenergie des Transformators auf. Es drängt zu einer unheimlich wichtigen Erkenntnis: Mehr Energie als das Kurzschlußstreufeld des Transformators fassen kann, steht für die Zerstörungsarbeit der Kurzschlußstromkräfte niemals zur Verfügung.

Wir wissen bereits, daß der dauernde Kurzschlußstrom im Streufeld eines großen Transformators nur ungefähr soviel Energie aufspeichert, wie er gleichzeitig in einer einzigen Kurzschlußperiode in Stromwärme umwandelt. Wir können den Höchstenergieinhalt des Streufeldes dreimal höher nehmen, wenn wir an den ungünstigsten Fall der sich voll unterstützenden beiden Kurzschlußströme denken. Andererseits müssen wir den Umstand berücksichtigen, daß die mechanische Arbeit der Kurzschlußstromkräfte beim Ausschöpfen der Streufeldenergie den Kurzschlußstrom, erst recht also seine Stromkraft, schwächt, weshalb sie nur vorsichtig eingesetzt werden kann. Unverkennbar ist somit die unvergleichlich ausgiebigere Ausstattung der Kurzschlußverbrennungsgefahr mit Energie neben der Ausstattung der Kurzschlußstromkraftgefahr. Es handelt sich um Verhältnisse 100:1, auch 500:1, je nach der Dauer des Kurzschlusses.

Daß die Kurzschlußstromkräfte einen derart schwachen Energierückhalt besitzen, überrascht. Die bisherige Theorie der Kurzschlußstromkraftgefahr nahm stillschweigend an, daß die Stromkräfte ungeschwächt weiter arbeiten, sobald sie ihre zerstörende Tätigkeit begonnen haben. Die dynamische Theorie des Problems sieht die Stromkräfte furchtbar drohend, jedoch kläglich in sich zusammensinkend, sobald sie ihre Drohungen zu verwirklichen anfangen.

Man darf die Kurzschlußstromkraftgefahr indessen nicht unterschätzen. Um ein Kilogramm Kupfer um 100°C zu erwärmen, was im Transformator Kurzschluß sehr wohl geschehen kann, braucht man rund 40000 Wattsekunden. Für das Zerreißen eines Kilogramms Kupfer sind nur rund 8000 Wattsekunden notwendig.

Dies ist noch nicht alles. Bevor ein Kupferstab zerrissen wird, muß er um rund 40 % seiner ursprünglichen Länge gedehnt werden. Weitaus geringfügigere Dehnungen des Wicklungskupferzylinders sind jedoch schon sehr gefährlich.

Wenn z. B. eine Großtransformatorspule eine mittlere Windungslänge von 2000 mm aufweist, vergrößert schon eine Kupferdehnung von 1 % ihren inneren Durchmesser um rund 6 mm und damit die Breite des Zwischenraums zwischen den beiden Wicklungszylindern um 3 mm. Die entsprechende Dehnungsarbeit ist kleiner als ein Vierzigstel der Zerreibarbeit, sie ist also kleiner als 200 Wattsekunden je Kilogramm Kupfer.

Man sieht: Die Energieeinsätze sind auf den beiden Ästen der Kurzschlußerscheinung wohl sehr verschieden, der thermische Energiebedarf überwiegt jedoch bei gleicher Gefahrschärfe den mechanischen ungefähr in demselben Ausmaß.

Man sieht ferner, daß Sprengungen des Wicklungskörpers durch die Kurzschlußstromkräfte wohl ausgeschlossen sind, daß jedoch ernst zu nehmende Dehnungen des Kupfers und unangenehme Beschädigungen des Wicklungstragkörpers im Bereich des Möglichen liegen.

Dies alles ist in befriedigendem Einklang mit den Erfahrungstatsachen, weshalb der Rückschluß berechtigt ist, daß das entworfenene rohe Bild der Kurzschlußenergiebewegung den Kern der Erscheinung ungefähr trifft. Trotzdem empfiehlt es sich, eine schärfere Untersuchung dieser Erscheinung anzustellen. Noch ist es ja ganz ungeklärt, auf welchem Wege die von den Kurzschlußstromkräften verbrauchte Energie aus der Stromquelle ins Freie gelangt.

15. Die bewegliche Induktivität des Transformators

Es steht fest, daß sich, von außen besehen, der kurzgeschlossene Transformator genau so verhält, wie eine mit Wirkwiderstand ausgestattete Drosselspule. Der für irgendeinen Kurzschlußaugenblick gültige Ansatz:

$$U_t = R \cdot I_t + L \cdot \frac{dI_t}{dt} \dots \dots \dots (37)$$

beschreibt alle von außen beobachtbaren Kurzschlußerscheinungen, vor allem die Abhängigkeit der Augenblicksstärke des Gesamtkurzschlußstroms I_t von der Augenblickshöhe der aufgedrückten Spannung U_t . Er läßt nicht erkennen, daß es einen Hauptkraftfluß gibt. Dieser Fluß hat eben nur eine Vermittlerrolle im gemeinsamen Spiel der beiden Wicklungshälften. Für das Außenbild gibt es keine Wicklungshälften. Daß es indessen für das Außenbild einen Gesamtstreufuß Φ_{st} :

$$\Sigma (w \cdot \Phi_{st}) = L \cdot I_t \cdot 10^8 \dots \dots \dots (38)$$

gibt, ist sehr bemerkenswert. Es empfiehlt sich sogar, Gl. (37) in der Form:

$$U_t = R \cdot I_t + \frac{d}{dt} (\Sigma \Phi_{st} \cdot w) \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots (37a)$$

zu schreiben — $\Sigma \Phi_{st} \cdot w$ ist natürlich die auf die Primärseite übertragene Gesamtverkettungszahl des Streuflusses —, um einzusehen, daß die genaue Untersuchung der Kurzschlußerscheinungen des Transformators den Ansatz:

$$U_t = R \cdot I_t + \frac{d}{dt} (L \cdot I_t) \dots \dots \dots (37b)$$

braucht.

Ist es denn nicht ausgemacht, daß die Induktivität der Transformatorwicklung L eine feste Größe ist? Keineswegs. Sie ist bekanntlich stark von der Breite des Zwischenraums zwischen der inneren und der äußeren Wicklungshälfte abhängig. Lassen wir die Möglichkeit, daß sich dieser Zwischenraum unter dem Einfluß der Stromkräfte ändert, zu, so müssen wir mit der Veränderlichkeit von L rechnen.

Damit ist aber klargestellt, was im vorangehenden Abschnitt unter der „Beschädigung des Streufeldenergiegeleises“ gemeint sein konnte. Nur so lange ist dieses Geleise der Weg einer kreisenden

Energiemenge, die aus der Stromquelle ins Streufeld des Transformators wandert und zur Gänze in die Stromquelle zurückkehrt, als die Wicklungsinduktivität fest bleibt. Daß nur bei Induktivitätsvergrößerungen Energie ins Gebiet der Kurzschlußstromkräfterscheinungen entweichen kann, läßt sich in der Tat leicht nachweisen.

Wir multiplizieren Gl. (37 b), die natürlich für irgendein Zeitgesetz der aufgedrückten Spannung U_t gilt, beiderseits mit $I_t \cdot dt$ und erhalten:

$$U_t \cdot I_t \cdot dt = R \cdot I_t^2 \cdot dt + L \cdot I_t \cdot dI_t + I_t^2 \cdot \frac{dL}{2} + \frac{I_t^2 \cdot dL}{2},$$

wobei die absonderlich erscheinende Zerlegung rechts die Feststellung erleichtern soll, daß:

$$L \cdot I_t \cdot dI_t + I_t^2 \cdot \frac{dL}{2} = d\left(\frac{L \cdot I_t^2}{2}\right)$$

gleich dem Differential der Streufeldenergie ist.

Wir bezeichnen noch mit:

$$dA = \frac{I_t^2 \cdot dL}{2} \dots \dots \dots (39)$$

und kommen zum Ergebnis:

$$U_t \cdot I_t \cdot dt = R \cdot I_t^2 \cdot dt + d\left(\frac{L \cdot I_t^2}{2}\right) + dA.$$

Die Stromquelle liefert im Zeitabschnitt dt vor allem die der Stromstärke I_t entsprechende Stromwärme. Sie liefert ferner die dem Stromanstieg dI_t und der Induktivitätsvergrößerung dL entsprechende magnetische Zusatzenergie. Darüber hinaus liefert sie jedoch noch die Energiemenge dA (Wattsekunden). Wohin geht diese Energie? Offenbar ins Gebiet der Stromkräfte. Sie deckt die mechanische Arbeit, die von der Stromkraft geleistet werden muß, damit die Induktivitätsvergrößerung dL zustande kommt.

Es ist außerordentlich bemerkenswert, daß die Stromquelle für jede Induktivitätsänderung einen genau bestimmten Energiepreis bezahlt. Sie kümmert sich nicht darum, wieviel mechanische Energie benötigt wird. Es macht ihr nichts aus, ob sie zu viel oder zu wenig gibt. Natürlich kommt eine ungenügende Lieferung nicht in Frage, weil in diesem Falle die angenommene Induktivitätsvergrößerung eben nicht erreicht wird. Ist dagegen die Stromquelle zu freigebig, wird außer der Gestaltänderungsarbeit noch eine unnötige Beschleunigungsarbeit an der Kupfermasse geleistet.

Die Stromquelle legt in den mechanischen Arbeitskreis der Stromkraft jeweils genau so viel Energie, wie in den mechanisch neu gewonnenen Streufeldraum. Deshalb ist nicht die magnetische Energie des ursprünglichen, von den Stromkräften noch unberührten Streufeldraumes ein Maß für die mögliche Zerstörungsarbeit der Kurzschlußstromkraft, sondern die magnetische Energie des zusätzlichen, erst im Laufe der Zerstörungsarbeit entstehenden Streufeldraumes und auch sie nur zum Teil. In dem bereits dem Streufeld eroberten Gebiet steigt der Energieinhalt weiter, wenn die Stromstärke noch steigt, ohne irgendwie mit seinem nachträglichen Wachsen für die Energie des mechanischen Arbeitskreises maßgebend zu sein.

Das genaue Bild der Energiebewegung im Bereich der Stromkrafterscheinungen ist sehr undurchsichtig. Einfach dagegen ist der Ausdruck der Gl. (39) für die Zerstörungsarbeit der Kurzschlußstromkraft. Kennt man einmal die Abhängigkeit der Induktivität L von der Kurzschlußstromstärke I_t , so steht der Berechnung der Stromkftarbeit:

$$A = \int_{L_0}^{L_t} \frac{I_t^2}{2} \cdot dL \quad \dots \dots \dots (40)$$

nichts mehr im Wege.

Das Bild bliebe unvollständig, wenn man es nicht noch durch eine Vereinfachung der Voraussetzungen erweitern würde. Die Drosselspule, die uns den ganzen Transformator ersetzt, sei ohne Wirkwiderstand. Die aufgedrückte Spannung U_t folge ferner dem Sinuszeitgesetz.

Bleibe die ursprüngliche Induktivität L_0 von den Stromkräften unberührt, so müßte natürlich mit:

$$U_t = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos \omega t$$

gelten:

$$\sqrt{2} U \cdot \cos \omega t = L_0 \cdot \frac{d I_t}{d t},$$

die Stromstärke I_t würde ebenfalls dem Sinuszeitgesetz folgen und den Höchstwert:

$$I_{\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot L_0}$$

erreichen (Abb. 16).

Sobald nun die Induktivität beweglich wird, gilt:

$$\sqrt{2} \cdot U \cdot \cos \omega t = \frac{d}{dt} \cdot (L \cdot I_t).$$

Jetzt folgt $L \cdot I_t'$ immer noch dem Sinuszeitgesetz, wie vorher $L_0 \cdot I_t$, erreicht auch denselben Höchstwert:

$$I_{\max}' \cdot L' = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega},$$

zerfällt aber jeweils anders in die beiden Faktoren I_t' und L . Die Stromstärke I_t' folgt nicht mehr dem Sinuszeitgesetz. Erreicht im Augenblick der Stromhöchststärke die Induktivität den Wert L' , so ist offenbar:

$$\frac{I_{\max}'}{I_{\max}} = \frac{L_0}{L'}.$$

Wertvolle Feststellungen sind an Hand des einfachen Bildes möglich. Zunächst sieht man, daß die Stromquelle nicht mehr die Stromstärken durchsetzen kann, die ohne Gestaltänderungen des Wicklungskörpers erreichbar sind. Ferner sieht man, daß nur dann der Strom ebenso abfällt wie er ansteigt, wenn die Dehnungen des Kupferkörpers wieder verschwinden, d. h., wenn sie federnd sind.

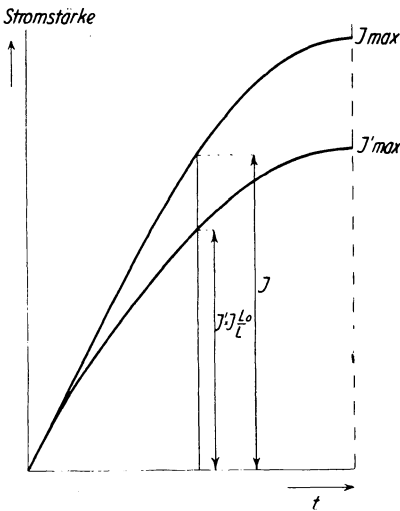


Abb. 16

Man kann auch die Tatsache nicht übersehen, daß die Stromquelle in den ursprünglichen, unverletzten Streufeldraum nicht mehr jene Energiemenge liefert, wie im Falle des starren Wicklungskörpers. Es handelt sich um den Unterschied:

$$L_0 \cdot \frac{I_{\max}^2}{2} - L' \cdot \frac{I_{\max}'^2}{2} = \frac{I_{\max}^2 \cdot L_0}{2} \cdot \left[1 - \frac{L_0}{L'} \right].$$

Dieser Unterschied ist dem Unterschied $I_{\max} - I_{\max}'$ (Abb. 16) proportional. Der ursprüngliche Streufeldraum bekommt nur noch die Hälfte jener Energiemenge, die ihm ein starrer Wicklungskörper

verspricht, wenn die Stromkräfte die Wicklungsinduktivität verdoppeln.

So kann der Eindruck entstehen, daß die Stromquelle bei ihrer Energielieferung in den mechanischen Arbeitsbereich der Kurzschlußstromkräfte den Umweg durch das Streufeld gehen muß. Deshalb ist das grobe Bild der Energiebewegung im Bereich der Kurzschlußstromkrafterscheinungen, das im vorigen Abschnitt entworfen wurde, scheinbar so zutreffend und dabei doch so rätselhaft. In Wirklichkeit wird jene Energie, die scheinbar durch das Streufeld in den mechanischen Arbeitsbereich wandert, dem Streufeld einfach vorenthalten und ohne Umwege in die mechanische Richtung gelenkt.

16. Induktivität und Stromkraft

Die Theorie des Transformators benützt gerne das in der Abb. I angedeutete, vereinfachte Bild des Streukraftflusses. Von der Tatsache ausgehend, daß die Streukraftlinien den beschwerlichen Weg durch den engen Ringspalt zwischen den beiden konzentrischen Wicklungshälften gehen müssen, wenn sie alle Windungen der primären oder der sekundären Wicklungshälfte umschlingen wollen, sieht sie mit Recht den Großteil des magnetischen Streuflußwiderstandes in diesem Wicklungszwischenraum zusammengeballt und rechnet deshalb einfach mit einer festen Streukraftlinienlänge l_s (cm), die nur wenig die axiale Ringspaltlänge übertrifft.

Diese „reduzierte Streukraftlinienlänge“ läßt die Theorie auch für jenen Teil des Streukraftflusses gelten, der nur einen Teil der primären oder der sekundären Windungen umschlingt. Deshalb sieht die vereinfachende Theorie im Wicklungszwischenraum überall dieselbe Streukraftflußdichte B , sie nimmt ferner aus demselben Grunde an, daß innerhalb der primären oder der sekundären Wicklungshälfte die Streukraftflußdichte in radialer Richtung geradlinig von B auf Null (Abb. 17) abfällt.

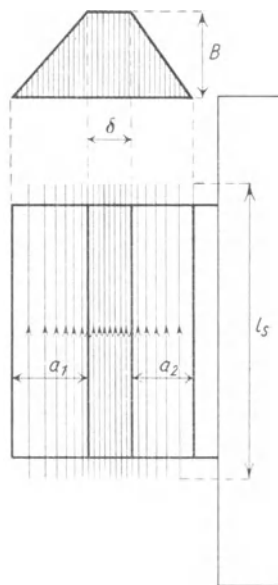


Abb. 17

Dieses gewiß einfache, und, wie die Erfahrung zeigt, sehr brauchbare Ersatzbild des Streukraftflusses ist indessen der Theorie nicht immer einfach genug. Es stört sie vor allem, daß es Streukraftlinien enthält, die nicht mit allen Windungen der einen oder der anderen Wicklungshälfte verkettet sind.

Deshalb entstand das noch einfachere Streukraftflußbild der Abb. 18, in dem es keine unvollkommenen Verkettungen mehr gibt. In ihm umschlingen alle Streulinien alle primären oder alle sekundären Windungen. Die Streulinien sind immer noch alle gleich lang (l_s).

Überall im Wicklungszwischenraum sind sie mit derselben Dichte B verteilt wie im ersten Ersatzbild. Diesmal muß jedoch ein breiterer Wicklungszwischenraum angenommen werden, damit bei der Nachrechnung die richtige Gesamtkraftlinienverkettungszahl herauskommt (Abb. 18).

So entsteht der Begriff des „reduzierten Wicklungszwischenraumes“, δ' (cm). Bezeichnet man den wirklichen Wicklungszwischenraum mit δ (cm), die radiale Höhe der einen Wicklungshälfte mit a_1 (cm), die der anderen mit a_2 (cm), entsprechend der Abb. 18, so muß bekanntlich:

$$\delta' = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \dots \dots (41)$$

gesetzt werden.

Führt man noch die mittlere Windungslänge U_m (cm) der bewickelten Säule ein, so kann man nach dem Ersatzbild der Abb. 18, dem Gesamtstreukraftfluß den

Durchtrittsquerschnitt $U_m \cdot \delta'$ zuschreiben. So ergibt sich die Gesamtstreukraftlinienzahl:

$$\Phi_s = B \cdot U_m \cdot \delta', \dots \dots \dots (42)$$

die natürlich jeweils der (primären oder sekundären) Durchflutung $I_t \cdot w$ proportional ist. Es gilt ja:

$$B = \frac{4 \pi}{10} \cdot \frac{I_t \cdot w}{l_s} \dots \dots \dots (43)$$

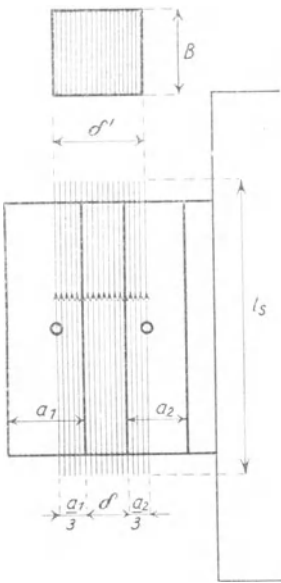


Abb. 18

Für den äußeren Beobachter ist es gleichgültig, wie sich der Gesamtstreukraftfluß auf die beiden Wicklungshälften aufteilt. Entschlossen, nur die Gesamtinduktivität des Transformators zu sehen, darf er annehmen, daß sich alle Streukraftlinien nach derjenigen Seite wenden, von der aus er in den Transformator hineinschaut. So öffnet sich der Berechnung der Gesamtinduktivität ein einfacher Weg. Diese Induktivität ist, in Henry ausgedrückt, dem Produkt der Gesamtstreulinienzahl bei $I_t = 1$, der Windungszahl w und der Maßkonstanten 10^{-8} gleich:

$$L_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w^2}{l_s} \cdot U_m \cdot \delta' \cdot 10^{-8} \text{ Henry (44)}$$

Was geschieht nun, wenn die Stromkraft die beiden Wicklungshälften um x cm auseinanderschiebt? Wie immer das geschehen mag, durch Dehnen der äußeren, durch Drücken der inneren Wicklungshälfte oder durch gleichzeitiges Dehnen und Drücken, wie in Abb. 19 vorausgesetzt, immer wird δ und deshalb auch δ' um x größer. Die entsprechende Gesamtinduktivität beträgt demnach:

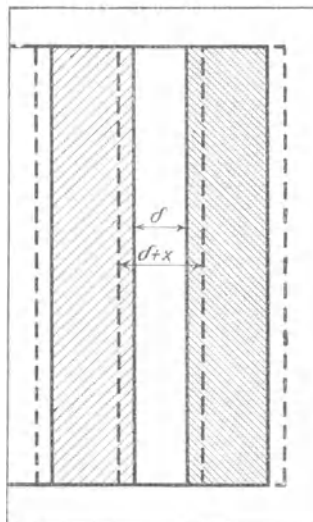


Abb. 19

$$L = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w^2}{l_s} \cdot U_m \cdot (\delta' + x) \cdot 10^{-8} \text{ Henry} \dots \dots \dots (45)$$

Die etwas gewaltsame Vereinfachung des Streukraftflußbildes, die in der Abb. 18 erreicht wurde, enthält eine Gefahr. Sie ist sehr brauchbar, wenn es sich um die Berechnung der Gesamtstreulinienzahl handelt. Sie erleichtert die Berechnung der Wicklungsinduktivität und des induktiven Spannungsabfalls. Sie verschleiert indessen die Tatsache, die in dem weniger einfachen Streukraftflußersatzbild der Abb. 17 noch leicht feststellbar ist, daß die einzelnen Windungen der beiden Wicklungshälften in verschiedenen dichten Streuflußteilen liegen.

Diese Tatsache ist, wie wir bereits aus dem 7. Abschnitt wissen, für die Berechnung der Stromkraft sehr wichtig. Nur die halbe Wicklungszwischenraumdichte kommt im Durchschnitt für die Größe

der Gesamtstromkraft in Betracht. Man erhält also nach dem Gesetz von Biot-Savart:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4\pi}{10} \cdot \frac{I_t \cdot w}{l_s} \right) \cdot U_m \cdot w \cdot I_t \cdot 10^{-1} \text{ Dyn} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w^2}{l_s} \cdot U_m \cdot 10^{-8} \cdot \frac{100}{9,81} \cdot I_t^2 \text{ kg} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{L_0}{\delta'} \cdot \frac{100}{9,81} \cdot I_t^2 \text{ kg} \dots \dots \dots (46) \end{aligned}$$

Gl. (46) gilt für die Stromkraft einer starren Wicklung. Setzt man indessen voraus, daß sich unter dem Einfluß der Stromkraft der Wicklungszwischenraum um x cm vergrößert, wobei die Gesamtinduktivität von L_0 auf L steigt, so erhält man zunächst aus den beiden Gleichungen (44) und (45):

$$L - L_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w^2}{l_s} \cdot U_m \cdot 10^{-8} \cdot x \text{ Henry,}$$

damit aber:

$$K_x = \frac{1}{2} \cdot \frac{L - L_0}{x} \cdot \frac{100}{9,81} \cdot I_t^2 \text{ kg} \dots \dots \dots (47)$$

Nun wollen wir voraussetzen, daß der Strom irgendwie von Null bis I'_{\max} steigt. Ferner nehmen wir an, daß die gleichzeitig mit dem Strom steigende Kraft die Wicklungshälften federnd dehnt und drückt, bei der Stromstärke I_t die Höhe K_x nach Gl. (47) erreicht und die Wicklungszwischenraumvergrößerung x durchsetzt. Bei dieser federnden Gestaltänderung des Wicklungskörpers wird bekanntlich die Arbeit von:

$$A = \frac{1}{2} \cdot K_x \cdot x \text{ Kilogrammzentimetern}$$

geleistet.

Es ist demnach:

$$A = \frac{1}{2} \cdot K_x \cdot x \cdot 10^{-2} \cdot 9,81 = \frac{L - L_0}{4} \cdot I_t^2 \text{ Wattsekunden, (48)}$$

andererseits aber nach Gl. (40):

$$A = \int_{L_0}^L \frac{I_t'^2}{2} \cdot dL \text{ Wattsekunden.}$$

Man findet leicht den Ansatz:

$$L - L_0 = k \cdot I_t'^2, \dots \dots \dots (49)$$

der die beiden Ausdrücke für die Gestaltänderungsarbeit in Einklang bringt, wobei bezeichnenderweise die Proportionalitätskonstante k keine Bedeutung zu haben scheint, denn sie kann, vorläufig wenigstens, irgendwie angenommen werden.

Der Transformatorenbau kann keinen anderen Standpunkt in seinen mechanischen Festigkeitsproblemen einnehmen als die übrigen Zweige der Elektrotechnik und der Gesamttechnik überhaupt. Er kann Gestaltänderungen nicht vermeiden. Er kann und muß jedoch darauf bestehen, daß sie möglichst federnd bleiben. Deshalb ist der Ansatz der Gl. (49) für das Kurzschlußstromkraftproblem außerordentlich wichtig. Er öffnet die Tür zu jenen Geheimnissen der Kurzschlußstromkrafterscheinungen, die verhüllt bleiben mußten, solange das Kurzschlußstromkraftproblem rein statisch behandelt wurde.

17. Federnde Gestaltänderungen des Wicklungskörpers

Aus der Schlußbetrachtung des vorletzten Abschnitts ist ersichtlich, daß sich der Transformator mit veränderlicher Gesamtinduktivität L insofern ebenso verhält wie der Transformator mit starrer Gesamtinduktivität L_0 , als die Produkte $L \cdot I_t'$ und $L_0 \cdot I_t$ in beiden Fällen dem gleichen Zeitgesetz folgen und die gleiche Höhe erreichen. Dies gilt allerdings nur dann genau, wenn es keinen Wirkwiderstand gibt.

Praktisch spielt der Gesamtwirkwiderstand bei neuzeitigen Transformatoren neben dem Blindwiderstand eine sehr untergeordnete Rolle. Deshalb ist es erlaubt, das Bild des ungünstigsten Kurzschlußfalls einfach in das Gebiet der veränderlichen

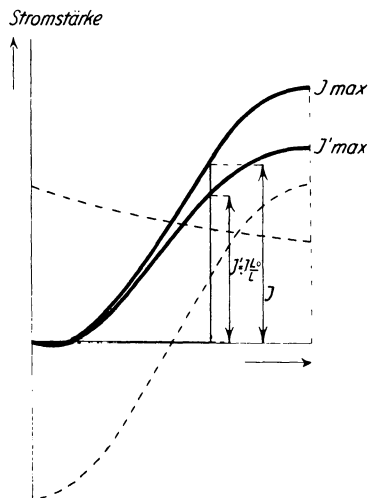


Abb. 20

Gesamtinduktivität herüberzunehmen. Man erhält dann das verallgemeinerte Bild der Abb. 20.

Es lehrt, daß sich der Gesamtkurzschlußstrom nicht mehr zu jener Höhe I_{\max} erheben kann, die ihm die starre Gesamtinduktivität L_0 verspricht. Die im kritischen Augenblick auf L' vergrößerte Induktivität drückt die Höchststromstärke auf:

$$I'_{\max} = I_{\max} \cdot \frac{L_0}{L'} \dots \dots \dots (50)$$

herunter.

Der wirkliche Wellenzug des Gesamtkurzschlußstroms entsteht aus dem ideellen, der starren Induktivität L_0 entsprechenden, durch Verkleinerung der Ordinaten in dem sich ändernden Verhältnis L_0/L' , das bis L_0/L' wächst. Wäre die Konstante k in Gl. (49) bekannt, könnte man ihn leicht entwerfen.

Sie ist leider nicht bekannt, nicht einmal fest. Wir müssen einen anderen Weg einschlagen. Gl. (48) muß herangezogen werden. Sie gibt wichtigere Angaben über die Arbeit der Kurzschlußstromkraft, als es zunächst den Anschein hat.

Es ist:

$$A_{\max} = \frac{L' - L_0}{4} \cdot I'^2_{\max} = \frac{L_0 \cdot I^2_{\max}}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{L_0}{L'} - \left(\frac{L_0}{L'} \right)^2 \right], \quad (48a)$$

die Kurzschlußstromkraftarbeit ist also im schlimmsten Falle ein Bruchteil der Streukraftflußenergie des kritischen Kurzschlußaugenblicks. Wie groß dieser Bruchteil ist, hängt von der Induktivitätsänderung, d. h. von der Erweiterung des Wicklungszwischenraumes ab.

So wichtig die neuerliche Aufdeckung eines Zusammenhanges zwischen der Stromkraftarbeit und dem Streufeldenergieinhalt erscheinen mag, wichtiger ist die Tatsache, daß A_{\max} eine elektrische Abhängigkeit von L_0/L' zeigt, daß sie aber andererseits auch eine mechanische Abhängigkeit von L_0/L' , nämlich von der Wicklungszwischenraumvergrößerung besitzen muß. Aus der doppelten Abhängigkeit muß sich endlich L' ergeben.

Wie steht es zunächst mit der elektrischen Abhängigkeit der Arbeit A_{\max} von L_0/L' ? Man sieht zunächst, daß A_{\max} einen Grenz-, einen Höchstwert besitzt, der bei der Verdoppelung des reduzierten Luftspaltes δ' durch die Kurzschlußstromkraft erreicht wird.

Mit

$$x + \delta' = 2 \cdot \delta' \text{ wird } L' = 2 \cdot L_0$$

und

$$A_{\max \max} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{L_0 \cdot I_{\max}^2}{2} \right) \dots \dots \dots (48 b)$$

d. h., mehr als ein Achtel der Streufeldenergie steht im schlimmsten Falle den Kurzschlußstromkräften für federnde Gestaltänderungen des Wicklungskörpers nicht zur Verfügung.

Versucht die Kurzschlußstromkraft über die Verdoppelung des reduzierten Luftspaltes δ' vorzustößen, so bekommt sie weniger und weniger Energie von der Stromquelle. Sie erschöpft sich gleichsam bei ihren Anstrengungen. Für sehr große federnde Gestaltänderungen des Wicklungskörpers hat die Stromquelle überhaupt keine Energie. Sprengungen erscheinen also unmöglich, selbst wenn Gestaltänderungen die Federungsgrenze überschreiten.

Greift man auf die beiden Gleichungen (44) und (45) zurück, so kann man die mögliche Kurzschlußstromkraftarbeit auch durch:

$$A = \frac{L_0 \cdot I_{\max}^2}{2} \cdot \frac{\delta' \cdot x}{2(\delta' + x)^2} \dots \dots \dots (48 c)$$

ausdrücken, womit sie in Abhängigkeit von der Wicklungszwischenraumerweiterung x erscheint. Diese Darstellungsart ist ungemein wichtig. Die für die Spalterweiterung x notwendige mechanische Arbeit folgt natürlich ihrem eigenen Abhängigkeitsgesetz. In einem gemeinsamen Schaubild (Abb. 21) vereinigt, liefern die beiden Abhängigkeitsgesetze den Schnittpunkt, der die Lösung des Kurzschlußstromkraftproblems festlegt.

Um diese Lösung wirklich erreichen zu können, muß man den möglichen Höchstenergieinhalt des Streufeldes im kritischen Augenblick des ungünstigsten Kurzschlußfalls kennen. Es gibt einen verhältnismäßig einfachen Weg zu dieser

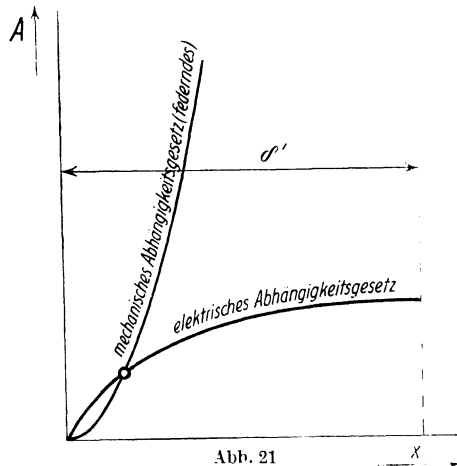


Abb. 21

wichtigen Größe, wenn keine übertriebene Genauigkeit verlangt wird.

Überwiegt der Blindwiderstand des Transformators den Wirkwiderstand erheblich, was angenommen werden darf, so gilt für die Effektivgrößen der Netzspannung und des Dauerkurzschlußstroms die Beziehung:

$$I_k = \frac{U}{\omega \cdot L_0}.$$

Nehmen wir nun an, daß am Ende der ersten Halbperiode des ungünstigsten Kurzschlußfalles noch immer 73 % des einsetzenden Kurzschlußausgleichsstroms vorhanden sind, was den praktischen Verhältnissen gut entspricht, so wird:

$$I_{\max} = 1,73 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = \sqrt{6} \cdot I_k = \frac{\sqrt{6} \cdot U}{\omega \cdot L_0}.$$

Es folgt:

$$\frac{I_{\max}^2 \cdot L_0}{2} = \frac{3 \cdot U}{\omega} \cdot I_k = \frac{N \cdot 100}{e_k \cdot \omega} \text{ Wattsekunden} \dots (51)$$

wenn N die Gesamtnennleistung des dreiphasigen Transformators (W), e_k seine Kurzschlußspannung in Hundertsteln und -- bei 50 Perioden -- $\omega = 314 \text{ s}^{-1}$ ist. Ein Großtransformator für 30000 kVA, 50 Per/s und 10 % Kurzschlußspannung hätte somit je Säule ungefähr eine Million Wattsekunden Streufeldenergie im kritischen Augenblick des ungünstigsten Kurzschlußfalles zu erwarten.

Zur praktischen Auswertung des Schaubildes der Abb. 21 gehört andererseits die Festlegung der mechanischen Abhängigkeit der Gestaltsänderungsenergie von x . Auch diese Festlegung gelingt leicht, wenn keine unnötige Genauigkeit verlangt wird.

Die Zerreiẞarbeit beträgt je Kilogramm Wicklungskupfer rund 8000 Wattsekunden. Hat der dreiphasige Transformator G_k Kilogramm Kupfer, so kann er mit:

$$A_z = \frac{8000}{3} \cdot G_k \text{ Wattsekunden je Phase} \dots (52)$$

zerrissen werden. Seine mittlere Windungslänge U_m wird dabei um ungefähr 40 % gedehnt. Die kritische Wicklungszwischenraum-erweiterung müßte somit zu:

$$x = \frac{0,4 \cdot U_m}{2 \cdot \pi} \dots (53)$$

angesetzt werden.

Die beiden Werte (52) und (53) bestimmen den Endpunkt der mechanischen Schaulinie der Abb. 22. Die Schaulinie selbst wäre eine Gerade durch den Koordinatenursprung, wenn es keine federnden Gestaltsänderungen geben würde. Sie sind es, die ein kurzes parabolisches Stück in den Anfang der Schaulinie einschalten. Dort, wo dieses Stück endet, liegt die sogenannte Federungsgrenze.

18. Bleibende Gestaltänderungen des Wicklungskörpers

Das Kupfer zeigt bekanntlich eigentümliche mechanische Festigkeitseigenschaften. Es hat keine Federungsgrenze. Geringe Belastungen lösen schon neben federnden auch bleibende Dehnungen aus. Es ist unmöglich, an diesen Tatsachen vorbeizugehen und so zu rechnen, als gäbe es noch zulässige mechanische Beanspruchungen des Wicklungskupfers durch Kurzschlußstromkräfte, die keine bleibenden Gestaltsänderungen hinterlassen.

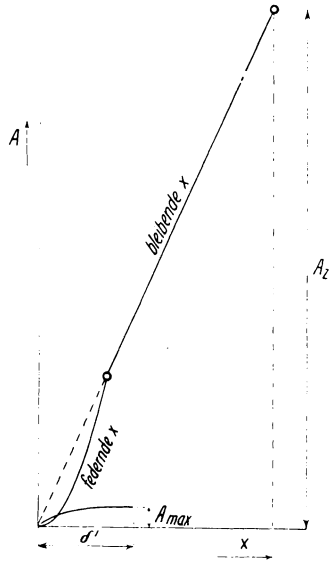


Abb. 22

Hat man nun bei der Stromkraft K_x neben der federnden Wicklungszwischenraumvergrößerung x_1 (cm) auch noch die bleibende x_2 (cm) zu erwarten, so muß man für die Gestaltsänderungsarbeit den Ansatz:

$$A = K_x \cdot \left(\frac{x_1}{2} + x_2 \right) = \frac{1}{2} \cdot K_x \cdot (x_1 + x_2) \cdot \frac{x_1 + 2 \cdot x_2}{x_1 + x_2} \text{ kgcm}$$

benutzen. Setzt man:

$$x = x_1 + x_2$$

und

$$\xi = \frac{x_1 + 2 \cdot x_2}{x_1 + x_2} \dots \dots \dots (54)$$

so hat man einerseits:

$$A = \frac{\xi}{2} \cdot K_x \cdot x \cdot 10^{-2} \cdot 9,81 = \xi \cdot \frac{L - L_0}{4} \cdot I_t^2 \text{ Wattsekunden (48 d)}$$

andererseits:

$$A = \int_{L_0}^{L'} \frac{I_t'^2}{2} \cdot dL \text{ Wattsekunden} \dots \dots \dots (55)$$

Der Berechnungsweg ist der gleiche wie im 16. Abschnitt.

Diesmal führt der Ansatz der Gl. (49) nicht mehr zum Ziele. Man muß ihn verallgemeinern, damit er der verallgemeinerten Problemstellung gerecht werden kann. Setzt man also:

$$L - L_0 = k \cdot I_t'^n \dots \dots \dots (49 a)$$

so bekommt man aus der Gl. (55):

$$A = \frac{L - L_0}{2} \cdot I_t'^2 \cdot \frac{n}{n+2} \dots \dots \dots (56)$$

und erreicht den Einklang der beiden Gleichungen (48 d) und (56) mit

$$n = \frac{2 \cdot \xi}{2 - \xi} \dots \dots \dots (57)$$

Die Überlegungen des vorangehenden Abschnitts bleiben in ihrem Wesen durch die Einführung bleibender Kupferdehnungen neben den federnden unberührt. Nach wie vor ist, wie man leicht feststellt, die Verdoppelung des reduzierten Spaltes eine Art Stabilitätsgrenze der Kurzschlußstromkraftarbeit. Nur ist die größte, aus der Stromquelle beziehbare Energiemenge des mechanischen Kurzschlußbereiches nicht mehr durch Gl. (48 b), sondern durch:

$$A_{\max \max} = \frac{\xi}{8} \left(I_0 \cdot \frac{I_{\max}^2}{2} \right)$$

gegeben.

Diesem Ergebnis merkt man sofort an, daß es einen größeren Geltungsbereich beansprucht, als ihm wirklich zukommt. Es ist unmöglich, anzunehmen, daß $\xi \geq 8$ werden kann, denn dann bliebe vom Streukraftfluß und deshalb auch vom Kurzschlußstrom nichts mehr übrig.

Glücklicherweise ist es nicht wichtig, zu wissen, wie groß ξ ist. Im Schaubild der Abb. 23 legt der Punkt:

$$A_0 = \frac{I_0 \cdot I_{\max}^2}{2}, \quad x = \delta$$

eine Gerade durch den Schaubildursprung fest, die jedenfalls die Schaulinie der elektrischen Abhängigkeit der Gestaltsänderungs-

arbeit rechts liegen läßt. Es kommt dann nur darauf an, daß die am Ende des vorangehenden Abschnitts festgelegte Schaulinie (Gerade) der mechanischen Abhängigkeit der Gestaltsänderungen links liegt.

So ergibt sich die Forderung:

$$\frac{8000 \cdot G_k}{\frac{3}{0,4 \cdot U_m}} \geq \frac{L_0 \cdot I_{\max}^2}{\frac{2}{\delta'}}$$

die mit Hilfe der Gl. (51) die Lösung:

$$\frac{\Lambda^{\text{kVA}}}{e_k^{o/0} \cdot G_k^{\text{kg}}} \leq 133 \cdot \frac{\delta' \text{ cm}}{U_m^{\text{cm}}} \dots \dots \dots (58)$$

des Kurzschlußstromkraftproblems liefert. Sobald Ungleichung (58) erfüllt ist, kann es höchstens nur überwiegend federnde, d. h. praktisch zulässige Gestaltsänderungen durch Kurzschlußstromkräfte geben.

Die gefundene Lösung ist um so bemerkenswerter, als sie weite Leistungsgebiete umspannen kann. Vergrößert man z. B. alle Abmessungen eines Transformators x -mal und läßt die Strom- und die Liniendichte unverändert, so steigt Λ , die Gesamtleistung des dreiphasigen Transformators (kVA), wie x^4 , das Gesamtkupfergewicht G_k aller drei Phasen (kg) wie x^3 , die Kurzschlußspannung e_k ($o/0$) fast ebenso wie der bezogene induktive Spannungsabfall, d. h. (s. 11. Abschnitt) wie x . Weder rechts noch links ändert sich demnach etwas in der Ungleichung (58), die allerdings nur für die übliche Periodenzahl 50 gilt.

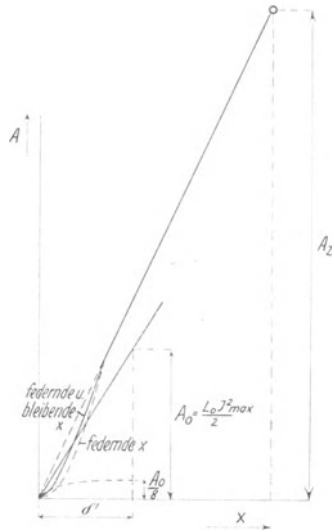


Abb. 23

Ungleichung (58) läßt ferner erkennen, daß die Kurzschlußspannung eine überragende Bedeutung für das Kurzschlußstromkraftproblem hat. Vergrößert man z. B. den reduzierten Spalt

y -mal, was den Transformator selbst wenig ändert, so wird auch der induktive Spannungsabfall, mit ihm aber praktisch auch die Kurzschlußspannung y -mal größer. Der Eingriff in das Kurzschlußkraftproblem entspricht y^2 .

Es bleibt nur noch die Frage: Werden gebaute Großtransformatoren der Ungleichung (58) gerecht? Um sie zu beantworten, greifen wir vorsichtshalber in die Anfänge des Großtransformatorenbaus zurück, in die Zeit, die noch verhältnismäßig bescheidene Kurzschlußspannungen hatte. In seinen „Transformatoren“ (L 1, S. 596) beschreibt der Verfasser einen großen Transformator aus dem Jahre 1912. Dieser Transformator soll der Prüfung unterworfen werden.

Er hatte:

$$N = 16000 \text{ kVA,}$$

konnte allerdings dauernd auch

$$N' = 20800 \text{ kVA}$$

vertragen, wenn seine Kühlwassermenge vom normalen Wert von 200 Liter/min auf 300 Liter/min erhöht wurde. Ferner hatte er

$$G_k = 855 + 1660 = 2515 \text{ kg,}$$

$$e_k = 5,5 \%,$$

$$U_m = 230 \text{ cm,}$$

$$\delta' = 5,4 \text{ cm,}$$

folglich:

$$\frac{16000}{5,5 \cdot 2515} \cdot \underline{1,1} < 133 \cdot \frac{5,4}{230} \cdot \underline{3,1}.$$

Der Transformator, seinerzeit der größte der Welt, war, wie man sieht, mechanisch vollkommen kurzschlußsicher, obwohl er dem Wicklungskupfer die ganze Bürde der Kurzschlußstromkräfte überlies. Hätte man ihm die Kurzschlußspannung auf 4% heruntergedrückt, so wäre er an der Gefahrengrenze angelangt gewesen.

Die durchgeführte Prüfung ergibt ein beruhigendes Bild. Sie warnt sogar vor den Übertreibungen in der Kurzschlußspannungsrichtung, die zweifellos vorgekommen sind und immer noch vorkommen. Die Kurzschlußstromkraftgefahr ist offenbar bei weitem nicht so groß wie man gerne annimmt.

19. Der bewegliche Wirkwiderstand der kurzgeschlossenen Wicklung

Im 13. Abschnitt stellten wir fest, daß man die Kurzschlußstromwärme praktisch der Stromwärme des dauernden Kurzschlußstroms I_k , der den normalen Nennstrom I bekanntlich $100/e_k$ -mal überragt, gleichsetzen darf. Dauert also der Kurzschluß T_k Sekunden und beträgt der Gesamtwirkwiderstand des Transformators R Ohm, so erhält man:

$$W = I_k^2 \cdot R \cdot T_k \text{ Wattsekunden}$$

Kurzschlußstromwärme.

Im Kurzschlußstromkraftproblem ist es, wie wir gesehen haben, außerordentlich wichtig, die scheinbare Starre des Blindwiderstandes fallen zu lassen. Das Kurzschlußstromwärmeproblem hat zwar weniger triftige Gründe, dem Wirkwiderstand R die scheinbare Unveränderlichkeit abzuerkennen, es muß jedoch diesen Weg einschlagen, um nicht ernststen Ungenauigkeiten die Tür zu öffnen.

Der Wirkwiderstand ist von der Kupfertemperatur abhängig. Unbelastet und lange ruhend, hat das Kupfer des Transformators die Temperatur der Umgebungsluft. Bei dauernder Vollast erhebt es sich um 70°C über die Umgebungstemperatur. Schwere Kurzschlüsse können gewaltige weitere Temperaturerhöhungen, um 70, selbst um zweimal 70°C , erzwingen. Mit welchem Wirkwiderstand soll also das Kurzschlußstromwärmeproblem rechnen: dem bei 35°C , dem bei 110°C oder gar dem bei 250°C ?

Das Kurzschlußstromwärmeproblem muß ebenso wie das Kurzschlußstromkraftproblem den schlimmsten Fall im Auge behalten. Das, was im Kampfe mit den Stromkräften das Schlimmste ist, ist indessen nicht das Gefährlichste, wenn es sich um die Auseinandersetzung mit der Stromwärme handelt.

Den höchsten Gesamtkurzschlußstrom und mit ihm den größten Stromkraftstoß erhält man, wenn der Kurzschluß dem Leerlauf folgt, wenn im Kurzschlußaugenblick der dauernde Kurzschlußstrom gerade seine Höchststärke haben muß und man erhält ihn am Ende der ersten Kurzschlußhalbperiode.

Dies alles ist für das Kurzschlußstromwärmeproblem unwichtig. Praktisch nur mit dem Dauerkurzschlußstrom beschäftigt, kümmert es sich in keiner Weise um den Ausgleichskurzschlußstrom. Der Kurzschluß Eintritts Augenblick ist ihm belanglos, dafür ist ihm die

Kurzschlußdauer außerordentlich wichtig. Der Übergang vom Leerlauf in den Kurzschluß schließlich ist nicht sein schlimmster Fall.

Die Kurzschlußstromwärme droht mit hohen Temperaturen und mit den Verbrennungsgefahren dieser Temperaturen. Es ist wesentlich gefährlicher, die Kurzschlußstromwärme im Kupfer von 110° C aufzuhäufen als im kalten Kupfer. Der schlimmste Fall des Kurzschlußstromwärmeproblems ist bei Kurzschlüssen zu suchen, die den lange voll belastet gewesenen Transformator befallen.

Man muß damit rechnen, daß sich die Kurzschlußstromwärme mit dem vollastwarmen Wirkwiderstand des Transformators zu entwickeln beginnt. Sicherlich beschließt sie am Kurzschlußende ihren Aufbau mit dem kurzschlußwarmen Wirkwiderstand. Auf dem Wege durch den Kurzschluß kann sich der Wirkwiderstand gewaltig, z. B. um 50% ändern. Ist es demnach überhaupt möglich mit einem festen Wert R zu rechnen?

Wünschenswert wäre es, diese Möglichkeit dem Kurzschlußstromwärmeproblem zu sichern. In Betracht käme natürlich ein Mittelwert zwischen dem vollast- und dem kurzschlußwarmen Wirkwiderstand. Könnte man sich ihm anvertrauen und wie groß wäre er?

Nehmen wir an, die Kurzschlußstromwärmeentwicklung beginne mit einem Wirkwiderstand R_0 des Wicklungskupfers, treibe innerhalb t Sekunden die Kupfertemperatur um $\vartheta^\circ\text{C}$ höher, vergrößere dabei denwicklungswirkwiderstand auf:

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot \vartheta) \text{ Ohm,}$$

— α wäre der auf die Anfangskupfertemperatur bezogene Temperaturkoeffizient — und speichere die ganze Wärme in den G_k Kilogramm des Wicklungskupfers, das eine spezifische Wärmeaufnahmefähigkeit $c_k \left(\frac{\text{Wattsec}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ haben möge, auf. Die den Kurzschluß erhaltende Netzspannung folge dem Sinuszeitgesetz und habe U effektive Volt. Die Transformatorwicklung habe schließlich neben ihrem Wirkwiderstand R auch noch einen festen Blindwiderstand $X (\Omega)$.

In dem dem Augenblick t folgende Zeitabschnitt dt würde — wir nehmen der Einfachheit halber an, daß die Stromwärmeentwicklung gleichmäßig fließt und nicht den Stromstärkeschwingungen folgt — die Stromwärmemenge:

$$\frac{U^2}{R_0^2 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta)^2 + X^2} \cdot R_0 (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot dt \text{ Wattsekunden}$$

Der bewegliche Wirkwiderstand der kurzgeschlossenen Wicklung 81

entstehen. Im Kupfer verbleibend würde sie eine Temperaturerhöhung $d \vartheta$ verursachen, wozu:

$$G_k \cdot c_k \cdot d \vartheta \text{ Wattsekunden}$$

notwendig sind.

Die Gleichsetzung beider Ausdrücke bestimmt die Abhängigkeit der Temperaturerhöhung ϑ von der Zeit t :

$$t = \frac{G_k \cdot c_k \cdot R_0}{U^2} \cdot \vartheta \cdot \left[1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} + \left(\frac{X}{R_0} \right)^2 \cdot \frac{\ln(1 + \alpha \cdot \vartheta)}{\alpha \cdot \vartheta} \right] \dots (59)$$

denn für $t = 0$ muß auch $\vartheta = 0$ sein. Nun kann man aber auch schreiben:

$$t = G_k \cdot c_k \cdot \frac{R_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\vartheta \cdot \alpha}{2} \right)^2 + X^2}{U^2 \cdot R_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right)} \cdot \vartheta.$$

$$\cdot \left[\frac{R_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right)^2 + X^2 \cdot \ln(1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot \frac{1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2}}{\alpha \cdot \vartheta}}{R_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right)^2 + X^2} \right] \dots (59a)$$

und sieht, daß man einfach mit dem festen Wirkwiderstand:

$$R = R_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right) \dots \dots \dots (60)$$

rechnen könnte, wenn der Klammerausdruck der Gl. (59a) gleich Eins wäre.

So groß die Kurzschlußtemperaturerhöhungen auch sein mögen, praktisch wird immer $\alpha \cdot \vartheta$ erheblich kleiner bleiben als Eins. Deshalb darf man wohl:

$$\ln(1 + \alpha \cdot \vartheta) \approx \alpha \cdot \vartheta - \frac{1}{2} \cdot (\alpha \cdot \vartheta)^2$$

setzen und dem störenden Klammerausdruck die einfachere Form:

$$\frac{R_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right)^2 + X^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right)^2 \right]}{R_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta}{2} \right)^2 + X^2}$$

geben. Der Fehler beträgt nur einige wenige Hundertstel, wenn man

$$1 - \left(\frac{\alpha \cdot \vartheta}{2}\right)^2 \approx 1$$

nimmt, womit erreicht ist, daß man die Kurzschlußstromwärme mit einem festen Wirkwiderstand berechnen kann, und zwar mit jenem Wirkwiderstand, der gerade dem Mittelwert der höchsten und der anfänglichen Kurzschlußkupfertemperatur entspricht.

Für das Kurzschlußstromwärmeproblem ergibt sich auf diese Weise eine Effektivstärke des Dauerkurzschlußstromes:

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{R_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta_k}{2}\right) + X^2}} \text{ Amp.} \dots \dots (61)$$

wobei R_0 der vollastwarme Gesamtwirkwiderstand, X der Gesamtblindwiderstand und ϑ_k die Kurzschlußtemperaturerhöhung im Kupfer ist.

Nach Gl. (59a) ist schließlich, wenn der Kurzschluß nach:

$$t = T_k \text{ Sekunden}$$

abgeschaltet wird, die Kurzschlußgesamtttemperaturerhöhung:

$$\vartheta_k = \frac{I_k^2 \cdot R_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta_k}{2}\right) \cdot T_k}{G_k \cdot c_k} \dots \dots \dots (62)$$

Für praktische Rechnungen ist es vorteilhaft, die dem Ausdruck (61) entsprechende effektive Kurzschlußstromdichte g_k einzuführen, die die normale Vollaststromdichte g ungefähr $100/e_k$ -mal übertrifft. Mit der spezifischen Verlustziffer k_0 , die nach Gl. (3) für die Vollasttemperatur zu berechnen wäre, bekäme man dann:

$$\vartheta_k = \frac{k_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta_k}{2}\right) \cdot 10^4}{c_k \cdot e_k^2} \cdot g^2 \cdot T_k \text{ Grade Celsius} \dots \dots (63)$$

bzw.

$$T_k = \frac{c_k \cdot e_k^2}{k_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta_k}{2}\right) \cdot 10^4 \cdot g^2} \cdot \vartheta_k \text{ Sekunden} \dots \dots (64)$$

Für 105^0 C mittlerer Vollasttemperatur des Wicklungskupfers ist:

$$k_0 = 2,62 \frac{\text{Watt} \cdot \text{mm}^4}{\text{kg} \cdot \text{A}^2} \dots \dots \dots (65)$$

20. Kurzschlußdauer, Überstromschutz und Lebensdauer

Die Lösung des Kurzschlußstromwärmeproblems muß aus den beiden Gleichungen (63) und (64) herausgelesen werden. Sie muß die Kurzschlußdauer T_k und die Kurzschlußtemperaturerhöhung ϑ_k in die richtige, d. h. verantwortbare Beziehung bringen. Was das heißt, muß allerdings erst festgelegt werden.

Transformatorenkurzschlüsse werden selbsttätig abgeschaltet. Dürfte der wachende selbsttätige Abschalter sofort handeln, wenn das Kurzschlußunglück hereinbricht, gäbe es kein Kurzschlußstromwärmeproblem. Der Überstromschutz muß leider anders eingerichtet werden.

Der Kurzschlußstrom ist für den Überstromschutz nur ein Überstrom, der nicht geduldet werden darf. Es gibt nun Überströme, die kurzlebig sind und deshalb verschwinden, ohne abgeschaltet werden zu müssen. Um überflüssige und deshalb unnötig störende Betriebsunterbrechungen zu vermeiden, wartet der gestoßene selbsttätige Schalter ein Weilchen. Vergeht der unerlaubte Strom nicht von selbst, dann schreitet der selbsttätige Wächter ein. Die Beobachtungsfrist kann auf einer besonderen Zeitverzögerungsvorrichtung des Abschaltes eingestellt werden. Sie kann eine Sekunde betragen, sie kann auf zwei, fünf, auch zehn Sekunden festgesetzt werden.

Kurzlebige Überströme vergehen sehr schnell. Meistens genügt eine Sekunde reichlich für ihr ganzes, praktisch bemerkbares Leben. Der Ausgleichskurzschlußstrom des Transformators z. B. ist nach zehn Perioden gewiß schon unbemerkbar. Das bedeutet ein Fünftel einer Sekunde Lebensdauer. Warum begrenzen wir also die Kurzschlußdauer nicht mit einer Sekunde, oder gar mit einer halben Sekunde?

In großen elektrischen Netzen wird die aus den Stromerzeugern kommende Energie mehrmals transformiert. Aus der Stromerzeugungstätte herauskommend, muß sie zunächst für die Hochspannungsfernleitung hergerichtet werden. Das besorgen große Transformatoren, die gleichsam Stützpfeiler der Fernleitung sind. Weitab von der Stromerzeugungstätte liegen die Versorgungsgebiete. Sind sie umfangreich, so müssen sie Zwischenspannungsleitungen von der Hochspannungsleitung abzweigen, um an sie schließlich zahlreiche kleine Transformatoren für Stromabnehmergruppen zu hängen.

Dieses Betriebsbild mahnt zur Vorsicht. Der Kurzschluß eines kleinen Transformators, irgendwo draußen in einem Versorgungsgebiet, kann zweifellos schnell, sagen wir nach einer Sekunde, abgeschaltet werden. Dieser Kurzschlußstrom des kleinen Transformators kann jedoch sehr wohl für den größeren Transformator, der die Zwischenspannungssader des Versorgungsgebietes mit der Hochspannungsfernleitung verbindet, ein unzulässiger Überstrom sein. Deshalb besteht die Möglichkeit, daß gleichzeitig mit dem verunglückten kleinen auch der größere Transformator selbsttätig abgeschaltet wird. Es könnte sogar vorkommen, daß der kleine Kurzschluß die große Hochspannungsfernleitung lahmlegen würde.

Das muß verhindert werden. Der Kurzschluß muß dort unterdrückt werden, wo er entsteht. Er darf nicht andere, unmittelbar nicht angegriffene Transformatoren belästigen. Deshalb muß der Zwischenspannungsgruppentransformator ein wenig länger zuwarten als der kleine Transformator seines Versorgungsgebietes, bevor er einen Überstrom abschaltet, und deshalb muß der große Fernleitungstransformator noch bedächtiger vorgehen als die von ihm abhängigen Zwischenspannungstransformatoren, wenn er Überströme niederzuschlagen hat. Diese bewährte Regel des aussondernden Überstromschutzes muß der bauende Transformatorenbau irgendwie berücksichtigen.

Der bauende Transformatorenbau kann nicht wissen, wo man seine Transformatoren einsetzen wird. Trotzdem kann er dem betriebführenden Transformatorenbau ausreichend entgegenkommen. Er weiß, daß kleine Transformatorenleistungen — von der Stromerzeugungsstätte aus gesehen — hinter größeren arbeiten und daß die größten Transformatoren die größten Arbeitsgebiete hinter sich haben. Daraus folgert er, daß die unvermeidliche Kurzschlußdauer des Transformators mit seiner Nennleistung wachsen können muß.

Wie stellt sich nun Gl. (64) zu dieser Forderung? Legt man ein für allemal die zulässige Kurzschlußtemperaturerhöhung ϑ_k für das ganze Leistungsgebiet fest und betrachtet die Nennleistungsstromdichte g als eine von der Nennleistung des Transformators unabhängige Größe, so sieht man die zulässige Kurzschlußdauer T_k mit dem Quadrat der Kurzschlußspannung e_k steigen und fallen.

Wir wissen bereits, daß e_k mit der Nennleistung wächst. Der für sie hauptsächlich maßgebende bezogene induktive Spannungs-

abfall ist bei festgelegter Strom- und Liniendichte der vierten Wurzel aus der Nennleistung proportional (11. Abschnitt). Gl. (64) verspricht also ein Zunehmen der zulässigen Kurzschlußdauer mit der Quadratwurzel aus der Nennleistung.

Dieses scharfe Wachstumsgesetz ist für die Befriedigung der Wünsche des aussondernden Überstromschutzes gar nicht nötig. Es würde z. B. das Leistungsgebiet von 100 bis 10000 kVA in die Kurzschlußdauerspanne von 1 bis 10 Sekunden ausbreiten. Zuweilen wurden sogar 12 Sekunden als Kurzschlußdauer sehr großer Transformatoren beansprucht. Man kommt indessen mehr und mehr zur Einsicht, daß es auch mit spärlicher bemessenen Kurzschlußabschaltzeiten geht.

Es muß sogar mit sehr knapp bemessenen Kurzschlußabschaltzeiten gehen! Die Zeiten bequemer Überstromschutzanordnungen, grober Abstufungen der Abschaltzeiten und ungeschlacht eingreifender Zeitverzögerungsvorrichtungen sind vorbei. Die Stabilität der Betriebe verträgt keine langen Überstromstörungen. Es ist z. B. nicht in Ordnung, Motoren deshalb kippen oder außer Tritt fallen zu lassen, weil Kurzschlüsse lässig abgeschaltet werden.

Für lange Kraftübertragungsfernleitungen können — das hat man allmählich herausgefunden — Zehntel von Sekunden der Kurzschlußabschaltzeiten wichtig und teuer werden. Auch deshalb geht es nicht mehr an, mit den altmodischen Abstufungen und Spannweiten der Kurzschlußabschaltzeiten zu rechnen.

Der Transformatorenbau allerdings kann sich weder um die Stabilität der Betriebe noch um die Ausnützbarkeit langer Fernleitungen kümmern, wenn er die Lösung seines Kurzschlußstromwärmeproblems sucht. Er hat lediglich festzustellen, welche Kurzschlußabschaltzeiten er höchstens zulassen darf. Braucht der neuzeitige Überstromschutz kleinere — um so besser.

Solange der entwerfende Transformatorenbau zu wissen glaubte, daß Wicklungstemperaturen oberhalb 110° C verboten sind, während der wenigen Kurzschlußsekunden also als ein Unglück hingenommen werden müssen, konnte es ihm recht sein, wenn Gl. (64) bei irgendeiner festgelegten Kurzschlußtemperaturerhöhung 10 oder gar 12 Sekunden erlaubte. Seit aber die Erkenntnis vorliegt, daß die Lebensdauer des Transformators in scharfer Abhängigkeit von der Betriebstemperatur des Wicklungskupfers steht (5. Abschnitt), muß ein anderer Standpunkt gelten. Welcher? Dem Kurzschluß des

großen und des kleinen Transformators kann offenbar nur ein bestimmter Bruchteil der Gesamtlebensdauer geopfert werden.

Bei Berücksichtigung dieses Standpunktes stoßt man nun auf folgendes Bild. Wenn ein kleiner Transformator im Kurzschluß 250°C erreicht, jedoch nach einer Kurzschlußsekunde abgeschaltet wird, hat er einen Teil seines Lebens verbraucht. Wenn ein großer Transformator vom Kurzschluß ebenfalls bis 250°C getrieben wird, jedoch erst in 8 Sekunden, so hat er scheinbar einen achtmal größeren Teil seiner Lebenskraft geopfert. Es scheint notwendig zu sein, ihm durch strengere Begrenzung der Kurzschlußerwärmung zu helfen.

Das Montsingersche Lebensdauergesetz (5. Abschnitt) stellt für je 8°C eine Lebensdauerverdoppelung, bzw. -hälfte in Aussicht. Es würde genügen, dem größeren Transformator die Kurzschlußtemperatur mit $250 \cdot (3 \cdot 8) = 226^{\circ}\text{C}$ zu begrenzen, denn dann zählen acht Kurzschlußsekunden ebensoviel wie eine Sekunde bei 250°C .

Geht es also nicht an, unterschiedslos 250 oder 200 oder 160°C als „zulässige“ Kurzschlußhöchsttemperatur vorzuschreiben? Es muß vor allem leider zugegeben werden, daß alle diese Grenztemperaturen nur schwach begründet in die bekannten theoretischen Arbeiten über das Kurzschlußstromwärmeproblem eingezogen sind. Es hat keinen Sinn, über scheinbar notwendige Feinheiten nachzudenken, solange grobe Willkürlichkeiten das Feld beherrschen.

21. Höchsttemperatur in der kurzgeschlossenen Wicklung. Abfluß der Kurzschlußstromwärme

Nehmen wir an, der Überstromschutz könnte alle Aufgaben, die man ihm stellt, befriedigend lösen, wenn das weite Nennleistungsgebiet des Transformators mit den beiden Kurzschlußdauergrenzen:

$$T_{k \min} = 1 \text{ Sekunde und } T_{k \max} = 10 \text{ Sekunden}$$

eingefaßt werden könnte. Welche Kurzschlußerwärmungen müßte der Transformatorenbau zulassen?

Auf hohe Temperaturen, bis 250°C , gefaßt, müssen wir in der Gl. (64):

$$k_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \vartheta_k}{2} \right) \cdot 3,1$$

ansetzen, denn es ist:

$$110 + \vartheta_k = 250.$$

Ferner kann für Öltransformatoren:

$$g = 4 \text{ A/mm}^2$$

angenommen werden. So erhält man nach Gl. (64) zunächst:

$$\frac{T_k}{\vartheta_k} = \frac{390 \cdot e_k^2}{3,1 \cdot 10^4 \cdot 16} = \frac{e_k^2}{1270}$$

Folgende zwei Grenzwertgruppen sind möglich:

$$T_k = 1 \text{ Sekunde, } 110 + \vartheta_k = 250^\circ \text{ C, } e_k = 3\%$$

und

$$T_k = 10 \text{ Sekunden, } 110 + \vartheta_k = 237^\circ \text{ C, } e_k = 10\%$$

Sie geben dem Kurzschlußstromwärmeproblem einen genügend großen Rahmen. Sie genügen überreichlich den Anforderungen des Betriebes, der vor allem einen verläßlich arbeitenden Überstromschutz haben muß. Sie verlangen allerdings gefährlich erscheinende Kurzschlußerwärmungen bzw. Kurzschlußhöchsttemperaturen.

Es kann kaum zweifelhaft sein, daß das ganze Kurzschlußstromwärmeproblem des Transformators in die Frage zusammengepreßt werden kann, welche Höchsttemperatur man im Kurzschluß dem Wicklungskupfer erlauben darf. So wichtig nun diese Frage erscheint, so mangelhaft wurde sie bisher von der Theorie des Transformators beantwortet.

Vor Jahren gab der Verfasser (L. 4, S. 111) 160° C als zulässige Kurzschlußhöchsttemperatur an. Er dachte dabei an die Temperatur der Wicklungsoberfläche und begründete seine Temperaturgrenze mit der Entflammbarkeit des Transformatorenöls.

Später kamen andere Gesichtspunkte. H. Prinz (L. 5, S. 37) hält eine Wicklungstemperatur von 180° C noch für zulässig. R. Kuchler (L. 6, S. 89) ist bereit, 200° C zuzulassen. Noch kühner ist G. N. Petroff (L. 7, S. 313). Er berichtet von Kurzschlußerwärmungsversuchen mit papierisolierten Kabeln und stellt fest, daß man der Papierhülle der Transformatorenwindungen kurzzeitig recht gut bis 250° C zumuten kann. Seine Temperaturgrenze scheint zwischen 200 und 250° C zu liegen.

Die Amerikaner wollen dem Transformatorenkupfer im Kurzschluß gar 250° C erlauben. Sie knüpfen allerdings ihre Großzügigkeit an einen Vorbehalt: Der Kurzschluß soll nicht länger als 5 Sekunden dauern.

Das Kurzschlußstromwärmeproblem verliert sich auf der Grenztemperaturseite in einem verdächtigen Nebel. Hat es denn überhaupt noch einen Sinn, zu rechnen, wenn man nicht weiß, was man will? Lauert denn nicht im Grenztemperaturnebel das uralte, scheinbar längst besiegelte und erledigte Stromwärmeproblem mit einem großen, ungelösten Rätsel? Soll man, darf man, dieses Rätsel ungelöst lassen?

Solange das 110⁰-Dogma herrschte, gab es keine Lösung, es gab, besser gesagt, kein Rätsel. Seit wir das Lebensdauergesetz kennen, gibt es keine eigentlich unzulässige Kurzschlußgrenztemperatur. Wir können uns für irgendeine Grenztemperatur, die wir zu brauchen glauben, entschließen. Wir müssen allerdings nachsehen, was sie kostet.

Es scheint, daß wir ungefähr 250⁰ C brauchen, um eine bequeme Erledigung der Kurzschlußschwierigkeiten zu ermöglichen. Was kosten 250⁰ C? Welchen Teil der Lebensdauer des Transformators nehmen sie für den Kurzschluß in Anspruch?

Im 5. Abschnitt stellten wir fest, daß der Transformator nur ungefähr 13 Minuten leben würde, wenn sein Kupfer 250⁰ C ertragen müßte. Das ist kein erfreuliches Bild. Allerdings sind 13 Minuten immerhin 780 Sekunden. Ein Kurzschluß, der 10 Sekunden dauern würde, würde also ungefähr 1,5% der ganzen Lebensdauer des Transformators verschlingen. Er müßte gefährlich, unerträglich werden, wenn er sich öfters einstellen würde.

Das Bild ist falsch. Der Kurzschluß beginnt, wenn es das Unglück will, mit 110⁰ C der dauernden Vollast, eigentlich mit der mittleren Kupfertemperatur von 105⁰ C und steigt fast mit gleichförmiger Geschwindigkeit bis 250⁰ C. Dauert er 10 Sekunden, so zählt er als Lebensverzehrer nicht mit jeder seiner Sekunde gleich viele Tage oder Wochen. Er ist offenbar weit weniger gefährlich als er uns im obigen oberflächlichen, falschen Bilde zu sein schien.

Nach Gl. (6) des 5. Abschnittes lebt der Transformator bei 110⁰ C ungefähr 4^{1/2} Jahre. Jede Sekunde unter der um ϑ^0 C höheren Temperatur des sich entwickelnden Kurzschlusses zählt 2⁸ Sekunden normaler Vollast. Ist also:

$$\vartheta = \vartheta_k \cdot \frac{t}{T_k}$$

so entsprechen T_k Kurzschlußsekunden:

$$\int_0^{T_k} 2^{\frac{\vartheta}{8}} \cdot dt = \int_0^{T_k} e^{\frac{\vartheta_k}{T_k} \cdot \frac{t}{11,5}} \cdot dt = \frac{T_k \cdot 2^{\frac{\vartheta_k}{8}}}{\frac{\vartheta_k}{11,5}} \dots \dots \dots (66)$$

Vollastsekunden.

Hätte der Kurzschluß während seiner T_k Sekunden durchwegs die Höchsttemperatur ϑ_k , so würde natürlich seine Dauer mit:

$$T_k \cdot 2^{\frac{\vartheta_k}{8}} \text{ Vollastsekunden}$$

zu bewerten sein. Der gleichförmige Temperaturanstieg von Null auf ϑ_k entwertet die lebensverzehrende Kraft der Grenztemperatur ϑ_k im Verhältnis $\vartheta_k : 11,5$. Deshalb gelten 10 Kurzschlußsekunden bei der Grenztemperatur nicht 1,5% der Lebensdauer des Transformators, sondern nur:

$$1,5 \times \frac{11,5}{250 - 110} = 0,0933 \%$$

Ein Tausendstel der Lebensdauer des Transformators zahlt man für einen sehr schweren Kurzschluß sehr gerne. Ist denn der dreiphasige volle Klemmenkurzschluß nicht ein seltener Gast? Muß er denn gerade im heißen Sommer anklopfen und gerade den vollbelasteten Transformator treffen? Ein Tausendstel der Lebensdauer des Transformators ist nichts. Man würde zweifellos auch ein volles Hundertstel auf sich nehmen.

Nun, die Rechnung ist noch nicht zu Ende, obwohl sie von der Theorie gerne mit dem Abschaltaugenblick des Kurzschlusses abgebrochen wird. Leider fängt das Kurzschlußstromwärmeproblem des Transformators eigentlich erst an, wenn der Kurzschluß für den Überstromschutz erledigt ist.

Wir sind gewohnt, anzunehmen, daß die Kurzschlußstromwärme zur Gänze im Wicklungskupfer des Transformators aufgehäuft wird, weil wir wissen, daß die Kühleinrichtung gerade nur der Vollaststromwärme gewachsen ist. Zuweilen nehmen wir wohl an, daß ein Teil der Kurzschlußstromwärme auch in der isolierenden Windungs- und Spulenhülle mitaufgespeichert wird und erhoffen uns aus dieser, zum Teil berechtigten Annahme eine kleine Erleichterung für das Kurzschlußstromwärmeproblem.

Wenn nun das Wicklungskupfer während der Kurzschlußsekunden die Kurzschlußwärme zur Gänze festhält, so hat es sie sicherlich noch in seinem Besitz, als der selbsttätige Abschalter einschreitet. Was macht es mit ihr?

Sie fließt nach dem Kurzschlußende ab. Wohin? Zunächst ins Öl. Das Öl des Transformators hat eine derart große Wärmeaufnahmefähigkeit, daß es sich kaum um einige Grade erwärmt, wenn es die ganze Kurzschlußstromwärme vom Kupfer übernehmen muß.

Am Beginn des Kurzschlußstromwärmeabflusses hat das Wicklungskupfer dieselbe Höchsttemperatur, wie am Ende des Kurzschlusses.

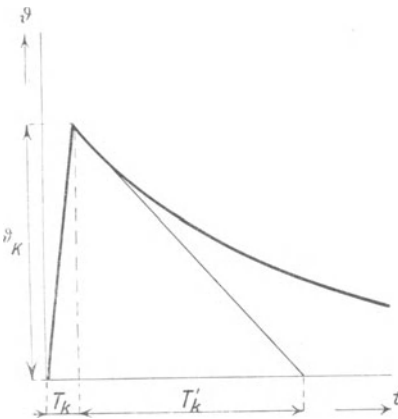


Abb. 24

Es kühlt sich dann, während des Wärmeabflusses ins Öl, in bekannter Weise ab. Es ist offenbar ein schwerer Fehler, nur den aufsteigenden Ast der Kupferkurzschlußtemperaturbildung (Abb. 24) zu berücksichtigen, den absteigenden jedoch zu vernachlässigen.

Der Fehler wird verhängnisvoll, wenn die Kurzschlußkupfertemperatur viel langsamer abfällt als sie ansteigt. Der am Leben des Transformators stärker zehrende Teil

der Kurzschlußstromwärmeerscheinung liegt dann hinter dem Kurzschlußende. Die Frage ist demnach ungemein wichtig, wie die Kurzschlußhöchsttemperatur im Wicklungskupfer nach dem Kurzschlußende abgebaut wird.

Folgende Überlegung drängt sich auf. Das Lebensdauergesetz des Transformators ist so scharf, daß es die hohen Temperaturen unverhältnismäßig vor den niedrigeren zur Geltung kommen läßt. Es ist deshalb vor allem wichtig, den Anfang des Kurzschlußtemperaturabstieges scharf zu erfassen. Wie der Abstieg gegen sein Ende zu verläuft, ist praktisch bedeutungslos.

Kann man nun berechnen, wie lange die Kurzschlußstromwärme aus dem Kupfer fließen müßte, um ganz ins Öl überzugehen, wenn sie durchwegs mit der anfänglichen Geschwindigkeit abströmen

würde? Wenn das gelingt, ist offenbar die Anfangstangente des absteigenden Astes in Abb. 24 festgelegt.

Bei normaler Vollast wirkt an der Wicklungs Oberfläche ein Temperaturunterschied $\Delta \vartheta$ ($^{\circ}\text{C}$). Er treibt in einer Sekunde die ganze gleichzeitig entstehende Stromwärme aus dem Kupfer ins Öl.

Im Augenblick des Kurzschlusses gibt es zwischen der Wicklungs Oberfläche und dem kalten Öl ϑ_k $^{\circ}\text{C}$. Deshalb kann eine entsprechend größere Stromwärmemenge in einer Sekunde ins Öl übertreten. Es ist sogar gestattet, eine

$$\left(\frac{\Delta \vartheta + \vartheta_k}{\Delta \vartheta}\right)^{5,4} \text{ mal}$$

stärkere Wärmeabgabe ins Öl anzunehmen als bei normaler Vollast (L. 1, S. 319).

Die im Kupfer aufgespeicherte Stromwärme entstand während T_k Sekunden, und zwar mit $\left(\frac{100}{e_k}\right)^2$ mal größerer Ergiebigkeit als bei normaler Vollast. Sie müßte:

$$T'_k = T_k \cdot \left(\frac{100}{e_k}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta \vartheta + \vartheta_k}{\Delta \vartheta}\right)^{5,4} \text{ Sekunden} \dots \dots \dots (67)$$

mit der anfänglichen Abflußstärke abströmen, um zur Gänze das Kupfer zu verlassen.

Man sieht: Der Abfluß der Kurzschlußstromwärme dauert viel länger als der Zufluß. Setzt man z. B.:

$$\begin{aligned} e_k &= 10^{\circ}, \\ \Delta \vartheta &= 20^{\circ} \text{ C}, \\ \vartheta_k &= 250 - 110 = 140^{\circ} \text{ C}, \end{aligned}$$

so erhält man:

$$T'_k = 7,4 \cdot T_k.$$

Für das Kurzschlußstromwärmeproblem dauert der Kurzschluß scheinbar z. B. 10, in Wirklichkeit jedoch 84 Sekunden. Bei kleineren Kurzschlußspannungen, bei kleineren Nennleistungen also, verschiebt sich das Verhältnis der Zufluß- zur Abflußzeit für die Kurzschlußstromwärme noch viel stärker zugunsten des Kurzschlußabbaus.

Aus den beiden Gl. (64) und (67) ersieht man jedoch, daß T'_k von e_k unabhängig ist. Der Preis, den man für den Kurzschluß bezahlen muß, ist demnach im ganzen Nennleistungsgebiet fast gleich hoch, wenn überall dieselbe Kurzschlußhöchsttemperatur ϑ_k eingehalten wird, weil die sichtbare Kurzschlußdauer neben der unsichtbaren fast gar keine Rolle spielt. Nur unmerklich steigt er mit steigenden Leistungen. Man kann also sehr wohl durchwegs, unabhängig von der Nennleistung des Transformators, an demselben Grenzwert für ϑ_k festhalten.

Darf dieser Grenzwert $250 - 110 = 140^\circ \text{C}$ betragen? Er verlangt dann fast ein volles Hundertstel der Lebensdauer des Transformators für einen Kurzschluß, allerdings für einen Kurzschluß schlimmster Art. Man kann die Frage bejahend beantworten. Man darf schließlich nicht zu ängstlich sein. Die Schärfe des Lebensdauergesetzes, das dem reifenden Transformatorenbau endlich eine klare Lösung des Kurzschlußstromwärmeproblems ermöglicht hat, ermutigt zu dem vorgeschlagenen Entschluß.

Eine Frage muß allerdings noch geklärt werden, bevor man sich endgültig entschließt, dem schlimmsten Kurzschlußfall ein Hundertstel der Lebensdauer des Transformators zu opfern. Opfert man wirklich ein Hundertstel des Transformatorlebens, wenn man eine Kurzschlußhöchsttemperatur von 250°C im Wicklungskupfer zuläßt, oder ist damit nur ein Hundertstel der Lebensdauer der isolierenden Windungs- und Spulenhülle eingesetzt?

Daß es sich nur um die empfindlichen festen Isolierstoffe handelt, ist klar. Neben ihnen wirkt jedoch noch das Öl. Wohl liegt es in der zweiten Verteidigungslinie, bekommt also den Kurzschlußwärmestoß sozusagen aus zweiter Hand und deshalb bereits abgeschwächt. Trotzdem, hält es ihn aus?

Das Öl ist ein gefährlicher Isolierstoff. Wenn es sich entzündet und zu brennen beginnt, kann es furchtbare Verheerungen anrichten. Das Kurzschlußstromwärmeproblem wäre nicht gelöst, wenn es nicht die Ölbrandgefahren in seiner Lösung mitberücksichtigen würde.

Wir greifen auf Abb. 3 zurück und denken daran, daß der Kurzschlußstromwärmestoß ein kaltes Öl von ungefähr: $35 + 50 - 10 = 75^\circ \text{C}$ trifft, wenn dem Kurzschluß die Vollast voranging. Wir erhalten dann einen Temperaturunterschied — roh gerechnet — von 250 auf 75°C zwischen dem heißesten Öl der kühlenden, die Wicklungsoberfläche entlang fließenden Ölschicht und dem kalten Öl.

Wir dürfen annehmen (4. Abschnitt), daß das warme Öl oben, unter dem Kastendeckel oder im Ölerhaltungsgefäß, kurz dort, wo es mit der Luft in Berührung kommt:

$$75 + \frac{250 - 75}{2} = 162,50^\circ\text{C}$$

haben wird.

Diese Öltemperatur ist zulässig, sie liegt unterhalb des sogenannten Entflammungspunktes. Man könnte ihr wohl vorwerfen, daß sie auf etwas schwachen Füßen stehe, denn sie kommt nur dann zustande, wenn das aufsteigende, wärmebeladene Öl nach dem Verlassen der heißen Wicklungsoberfläche die nötige Zeit findet, seine großen inneren Temperaturunterschiede auszugleichen.

Es gibt ein Hilfsmittel, das über diese, möglicherweise doch ernst zu nehmende Schwierigkeit verlässlich hinweghilft. Der Verfasser läßt keine uneingewickelten Leiter, weder hoch- noch niederspannungsseitig in Transformatorenwicklungen zu, außerdem verlangt er eine Mindeststärke der isolierenden Leiterhülle, die, vom Standpunkt des Spannungsproblems aus, überflüssig erscheinen mag, die jedoch ein verlässlicher Mitkämpfer im Kurzschlußstromwärmeproblem ist. Die isolierende Leiterhülle nimmt einen erheblichen Teil des anfänglichen Temperaturunterschiedes zwischen dem kurzschlußwarmen Kupfer und dem vollastkalten Öl auf sich, wenn sie richtig bemessen wird, und schützt damit das Öl.

Nehmen wir an, die Wicklungsoberfläche sei bei normaler Vollast mit 10 Watt/dm^2 belastet. Bei einer Kurzschlußhöchsttemperatur von 250°C kann sich dann leicht eine Anfangsstärke von 100 W/dm^2 des abfließenden Kurzschlußwärmestroms einstellen. Ist nun die Wicklungsleiterhülle mindestens 1 mm stark, so wird sie ungefähr 100°C auf sich nehmen können.

Es handelt sich offenbar nicht um übertriebene Mindeststärken der Wicklungsleiterhülle. Vielleicht kann man sich mit $0,5 \text{ mm}$ begnügen, hoffend damit ungefähr 50°C zwischen das kurzschlußwarme Kupfer und die sich gefährlich erwärmende, die Wicklungs-oberfläche kühlende Ölschicht zu schieben.

Die auf einer, dem Kurzschlußstromwärmeproblem angepaßten Mindeststärke der Wicklungsleiterhülle aufgebaute Sicherung des Öles ist wahrscheinlich kaum zu vermeiden. Übrigens sind unisolierte Windungen, die bei den allerersten Großtransformatoren das Wick-

lungskupfer in unmittelbare Berührung mit dem Öl gebracht haben, im Laufe der Zeit aus dem Großtransformatorenbau verschwunden. Die mit ihrer Stärke über die Forderungen des Spannungsproblems hinausgehende Windungsleiterhülle ist berufen, ungefähr dieselbe Rolle zu spielen wie eine Schutzdrossel. Im normalen Betrieb eine unerwünschte, ein wenig störende Beigabe, wird sie in ernstesten Augenblicken hereinbrechenden Unglücks ein wertvoller Helfer.

Schließlich darf man nicht vergessen, daß die neuzeitigen kleinen Kurzschlußabschaltzeiten die ursprüngliche Schärfe des Kurzschlußstromwärmeproblems wesentlich abgebaut haben. Wir brauchen keine 10 Sekunden mehr. Wir brauchen deshalb wohl auch keine 250°C mehr. Wir meistern das thermische Kurzschlußproblem des Transformators bequem. Endlich scheinen die letzten Reste des alten Stromwärmeproblems im Transformatorenbau weggeräumt zu sein.

II. Der einphasige und der zweiphasige Kurzschluß

22. Das Grundgesetz des Nennleistungsgebiets und das Kurzschlußproblem

Aus den Tiefen des schlimmsten dreiphasigen Kurzschlusses blickt man unwillkürlich noch einmal zu den beiden Gipfeln der Kurzschlußgefahren des Transformatorenbaues empor, bevor man sich entschließt, einen anderen Beobachtungsstandpunkt einzunehmen. Hat man nacheinander die Höhe des Stromkraft- und des Stromwärmegipfels sorgfältig ausgemessen, so wünscht man sich schließlich ein beide Spitzen vereinigendes, wenn auch oberflächliches Gesamtbild.

Es hat sich im Laufe der Untersuchungen der Kurzschlußerscheinungen, die wir im vorangehenden Hauptstück durchgeführt haben, erwiesen, daß es notwendig ist, in das weite Nennleistungsgebiet des Transformators ein grundlegendes Wachstumsgesetz einzuführen, um allgemein gültige Lösungen des Kurzschlußstromkraft- und des Kurzschlußstromwärmeproblems zu ermöglichen. Dieses unumgänglich notwendige Gesetz lautet: Man halte an einer richtiggewählten Nennleistungsstromdichte und ebenso an einer passenden Leerlaufsliniendichte fest, mache auch die Gestalt des Transformators von der Nennleistung unabhängig und ändere lediglich den Hauptabmessungsmaßstab, wenn man Leistungsänderungen anstrebt.

Es ist erstaunlich, wie gut dieses Grundgesetz allen wichtigen Problemen des Transformatorenbaues gerecht wird, nicht nur dem Kurzschlußproblem. Die Begrenzung der Liniendichte z. B. wurde schon vor Jahrzehnten vom Leerlaufstrom erzwungen. Die Begrenzung der Stromdichte andererseits wird von den Schwierigkeiten des Kühlungsproblems nahegelegt.

Darüber hinaus fordert der Kleinstwert der Transformationskosten, als Ziel des wirtschaftlich einwandfreien Aufbaues und Betriebes des Transformators, gebieterisch die Einführung des oben angeführten Grundgesetzes in seinem vollen Umfange. Nicht nur das, er legt sogar die Linien- und die Stromdichte ungefähr so fest, wie es der Leerlaufstrom (etwa 14000 G) und das Problem der natürlichen Ölkühlung (etwa 4 A/mm²) haben wollen.

Es ist bekannt, daß die Baukosten des Transformators, bei festgelegten Dichten, von der Gestalt des Transformators abhängen. Es ist für den sparsamen Entwurf nicht einerlei, in welchem Verhältnis z. B. die Säulenlänge zum Säulendurchmesser steht. Die günstigste Gestalt ist das Ziel der Entwurfstheorie. Der Entwurfstheorie ist es natürlich recht, wenn die Kurzschlußtheorie eine bleibende Gestalt im Fluß der Nennleistungen fordert.

Allerdings, der Fluß der Nennleistungen entspringt irgendwo. Dort, im Gebiet der Klein- und Kleinstleistungen, ist alles auf die Spitze getrieben, vor allem der Leerlaufstrom und die Spannungsabfälle. Dort ist es unmöglich, mit den das offene Leistungsfeld beherrschenden festen Strom- und Liniendichten durchzukommen. Nimmt man jedoch dieses Sondergebiet kleiner Leistungen aus, so gewinnt man mit dem oben geforderten Grundgesetz eine wunderbare Ordnung, die, einmal erkämpft, nicht mehr vermißt werden kann.

Was hat nun das Kurzschlußsicherheitsproblem von dieser Ordnung? Vor allem das richtige Wachsen der Kurzschlußspannung bei wachsender Leistung. Bei größeren Leistungen überwiegt der induktive Spannungsabfall den Ohmschen so stark, daß die Kurzschlußspannung ihm vollkommen folgen muß. Sie wächst deshalb mit der vierten Wurzel aus der Nennleistung.

Wir haben gesehen, daß gerade dieses Wachstumsgesetz der Kurzschlußspannung gefordert werden muß, damit bei einer festgelegten Nennleistungsstromdichte die mechanischen Zugbeanspruchungen des Wicklungskupfers, verursacht durch Kurzschlußstromkräfte, von der Nennleistung des Transformators unabhängig bleiben.

Wir haben ferner gesehen, daß dasselbe Wachstumsgesetz der Kurzschlußspannung dem Transformator Kurzschlußabschaltzeiten erlaubt, die den Anforderungen eines zufriedenstellend eingerichteten Überstromschutzes vollauf gerecht werden und gleichzeitig doch vor

einer für das ganze Leistungsgebiet feststehenden Kurzschlußhöchsttemperatur Halt machen.

Wie hoch sind nun die beiden Gipfel des Kurzschlußgefahrgebietes, wenn man sie von der Tiefe des ungünstigsten dreiphasigen Kurzschlusses aus mißt? Unterliegt das ganze Nennleistungsgebiet wirklich dem geforderten Grundgesetz und bleibt die Nennleistungsstromdichte wirklich auf 4 A/mm^2 stehen, so kann, wie wir gesehen haben, die höchste mechanische Beanspruchung des Wicklungskupfers mit etwa 600 kg/cm^2 begrenzt bleiben und die Höchsttemperatur im Kupfer braucht 250°C nicht zu übersteigen.

Es ist dabei gar nicht einmal notwendig, die Kurzschlußspannungen übermäßig hoch zu halten. Es scheint, daß man etwa 6% Kurzschlußspannung einer Nennleistung von 10000 kVA zuordnen kann, ohne befürchten zu müssen, in irgendeiner Richtung nicht reichlich gesichert zu sein.

Außerordentlich bemerkenswert ist die Tatsache, die ebenfalls im Laufe der Untersuchungen des ersten Hauptstückes festgestellt werden konnte, daß der „schlimmste“ dreiphasige Kurzschluß entweder den schlimmsten Kurzschlußstromkraft- oder den schlimmsten Kurzschlußstromwärmefall bringt, nie jedoch beide gleichzeitig. Es klafft fast ein Abgrund zwischen den Kurzschlußgefahrgipfeln, es liegt zum mindesten ein tiefer Sattel zwischen ihnen.

Unverkennbar haben trotzdem beide Kurzschlußgefahren ein gemeinsames Höhenmaß: Die Kurzschlußspannung. Sie ist ein sehr scharfes Maß. Hinter ihr steht natürlich die Stärke des Dauerkurzschlußstroms. Es ist nur natürlich, daß man beim Wechseln des Beobachtungsstandpunktes doch immer wieder zur Stärke des Dauerkurzschlußstroms zurückkehren muß.

Die Untersuchung der Erscheinungen des dreiphasigen Kurzschlusses führte schließlich zu zwei überraschenden Bildern, die die beiden Gefahrgipfel in ein merkwürdiges Licht tauchen. Das eine steht hinter der Ungleichung (58), das andere hinter dem Gleichungspaar (64) und (67). Die beiden Bilder verdienen es, daß man sie noch einmal aufmerksam ansieht.

Die Ungleichung (58) erzählt, daß die Kurzschlußstromkräfte überhaupt ohnmächtig wären, wenn es keine federnden oder wenigstens zum Teil federnden Gestaltänderungen des Kupfers geben würde. Eine derart beruhigende Aussage erwartet man sicherlich nicht, wenn man die Kurzschlußstromkrafttheorie befragt.

Nun, man muß gut zuhören. Das Gebiet der rein bleibenden Gestaltänderungen ist verbotenes Gebiet. In ihm braucht die mechanische Beanspruchung des Kupfers nicht mehr zu steigen, obwohl die Dehnungen größer und größer werden: Das Kupfer fließt dort dem Bruche zu.

Die Ungleichung (58) verspricht also keineswegs harmlose Wirkungen der Kurzschlußstromkraft, sie warnt eindringlich vor der Fließgrenze des Kupfers. Verwandelt sich in ihr das Ungleichheits- in Gleichheitszeichen, so ist das Unglück schon da. Daß dieses Unglück, wie wir festgestellt haben, den „reduzierten Spalt“ praktisch höchstens verdoppeln kann, ist ein magerer Trost.

Das Rechnungsbeispiel des 18. Abschnittes ergab ein Ungleichheitsverhältnis 3 : 1 für die Ungleichung (58). Das bedeutet, daß der in ihm geprüfte Transformator nur das erste Drittel der Fließgrenzhöhe erreicht. Erwartet man die Fließgrenze bei rund 2000 kg/cm^2 Zugspannung, so hat man demnach in dem nachgerechneten besonderen Falle etwa 700 kg/cm^2 Höchstzugspannung im Wicklungskupfer zu erwarten.

Nach all dem gibt Ungleichung (58) lediglich ein Maß der mechanischen Höchstbeanspruchung des Wicklungskupfers. Sie knüpft damit an ältere Formen der Gefahreinschätzung im Kurzschlußstromkraftproblem an. Sie geht trotzdem über die älteren Bilder hinaus. Sie zeigt vor allem, daß reine Federung des Wicklungskupfers nicht so wichtig ist, wie man zu glauben gewohnt war. Die bescheidenen bleibenden Gestaltänderungen durch Kurzschlußstromkräfte, die sich bei 600 oder 700 kg/cm^2 Zugbeanspruchung im Wicklungskörper ergeben können, sind praktisch bedeutungslos.

Das zweite Bild, das Bild der Gl. (64) und (67) erzählt, daß merkwürdigerweise neben der Höchsttemperatur des Kurzschlusses die Kurzschlußdauer praktisch keine Rolle spielt. Die Dauer des Kurzschlußwärmeabflusses ist eben von der Kurzschlußdauer unabhängig und ihr weitaus überlegen. Das abschließende Bild des Kurzschlußstromwärmeproblems zeigt eine Kupferhöchsttemperatur von 250°C als Vernichterin eines Hundertstels der Lebensdauer des Transformators.

Welches der beiden Bilder ist ernster zu nehmen? Es liegt nahe, die Kurzschlußstromkraftgefahr in düstereren Farben zu sehen als die Kurzschlußstromwärmegefahr. Die mechanische Höchstbeanspruchung nähert sich im oben beschriebenen Bilde verdächtig der

halben Zerreißspannung, die thermische Höchstbeanspruchung des zweiten Bildes nagt erst am ersten Hundertstel der Lebensdauer des Transformators.

Man darf nun nicht vergessen, daß der schlimmste Fall des Kurzschlustromkraftstoes dreiphasiger Kurzschlüsse viel unwahrscheinlicher ist als der schlimmste Fall des Kurzschlußstromwärme- stoes. Abgesehen davon, daß dort die dem Leerlauf, hier die der Vollast folgenden Kurzschlüsse in Betracht kommen, ist der schlimmste Stromkraftfall von einem bestimmten Augenblickswerte der Netzspannung im Kurzschlueintrittsaugenblick abhängig, während dem schlimmsten Stromwrmefall diese Abhängigkeit vollständig fehlt.

Das stark verschobene Wahrscheinlichkeitsverhältnis der beiden Kurzschlugefahrenarten verschiebt natürlich die für je einen Kurzschlußfall der einen und der anderen Art aufgestellte Bewertung erheblich. Es nimmt dem Kurzschlußstromkraftproblem die über- ragende Bedeutung, die es im Rahmen der Kurzschlußtheorie des Transformators zu beanspruchen scheint und stellt es als ein nur ungefähr ebenbürtiges Teilproblem neben das Kurzschlußstrom- wrmeproblem.

Dieses Bewertungsgleichgewicht kann sich nicht ändern, wenn der Beobachtungsstandpunkt gewechselt wird, wenn man z. B. drei- phasige Kurzschlüsse verläßt und einphasige oder zweiphasige zu untersuchen beginnt. Es leidet eben nicht darunter, daß sich mg- licherweise die Stärke des Dauerkurzschlußstroms ändert. Sie ändert sich ja für beide Kurzschluteilprobleme und bleibt offenbar für beide in derselben Weise maßgebend, in der sie beim dreiphasigen Kurzschluß maßgebend war.

23. Der einphasige Kurzschluß und die Wesenssymmetrie des dreiphasigen Transformators

Verläßt man das Gebiet des dreiphasigen Kurzschlusses, um den dreiphasigen Transformator im einphasigen Kurzschluß zu beob- achten, so erwartet man zunächst keine neuen Bilder. Ist denn im dreiphasigen Kurzschluß nicht jede der drei Transformatorphasen kurzgeschlossen? Haben wir uns im ersten Hauptstück nicht durch- wegs mit einer einzigen Transformatorphase beschäftigt? Besteht der dreiphasige Kurzschluß nicht aus drei gleichen einphasigen Kurzschlüssen?

Gewiß zerfällt der dreiphasige Kurzschluß des Transformators in drei vollkommen gleiche einphasige. Es ist jedoch nicht einerlei, ob alle drei Transformatorphasen dasselbe tun oder nicht. Der Kurzschluß einer Phase des Transformators entwickelt sich wesentlich anders, wenn er nicht von Kurzschlüssen in den beiden anderen Phasen begleitet wird. Deshalb ist der einphasige Kurzschluß des Transformators neben dem dreiphasigen eine selbständige Erscheinung und aus demselben Grunde ist auch der zweiphasige Kurzschluß anders als der einphasige und der dreiphasige.

Der dreiphasige Transformator europäischer Bauart kann seinen Glauben an die Symmetrie des zu transformierenden dreiphasigen Systems nicht verleugnen. Seine drei eisernen Säulen münden auf

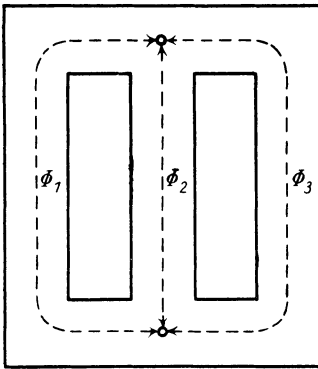


Abb. 25

ihren beiden Enden in je einem gemeinsamen eisernen Joch (Abb. 25). Seine drei Phasenkraftflüsse sind unverkennbar beiderseits in Stern geschaltet. Das dreiphasige magnetische System dieses Transformators hat indessen keinen Nullleiter. Es erwartet also keine Unsymmetrien.

Es kann nicht zweifelhaft sein, daß eine jede unsymmetrische Belastung tief in das Wesen des dreiphasigen Transformators hineingreifen muß. Der Kurzschluß ist

immer gleichbedeutend mit der größten möglichen Belastung. Deshalb greift der einphasige Kurzschluß in die größten Tiefen des dreiphasigen Transformators und muß Erscheinungen gewaltigen Ausmaßes aufwühlen, Erscheinungen, die dem dreiphasigen symmetrischen Kurzschluß fremd bleiben müssen.

In seinen Anfängen dachte der Transformatorbau sicherlich nicht daran, daß eine jede unsymmetrische Belastung eine Lebensfrage des dreiphasigen Transformators werden mußte. Wir kamen erst verhältnismäßig spät dazu, festzustellen, wie der dreiphasige Transformator mit den, seinem Wesen fremden, einseitigen, d. h. unsymmetrischen Belastungen fertig wird. Wir waren merkwürdigerweise gar nicht sonderlich überrascht, zu sehen, daß er es überhaupt tut. (L. 9, 1927, H. 5).

Von der Theorie des einphasigen Kurzschlusses des dreiphasigen Transformators laufen viele Fäden zur Theorie des dreiphasigen Beleuchtungstransformators. Im Lichtbetrieb sind unsymmetrische Belastungen der dreiphasigen Versorgungsnetze und der sie speisenden Transformatoren unausweichlich.

Im einphasigen Kurzschluß sind allerdings die bemerkenswerten Sondererscheinungen, die der dreiphasige Beleuchtungstransformator kennt, auf die Spitze getrieben. Einzelheiten, die im Bilde einer normalen, d. h. dauernd zulässigen, rein einphasigen Belastung nebensächlich erscheinen und deshalb zumeist vernachlässigt werden dürfen, können im Bilde des einphasigen Klemmenkurzschlusses des dreiphasigen Transformators nicht mehr übersehen werden. Man kann die Theorie des einphasigen Kurzschlusses als eine verfeinerte und vertiefte Theorie des dreiphasigen Beleuchtungstransformators ansehen. Man muß ihr jedoch andere, eigene Ziele setzen. Sie ist ja schließlich doch nur ein Teil der Theorie des kurzgeschlossenen Transformators.

Die Theorie des einphasigen Kurzschlusses des dreiphasigen Transformators muß sich ebensolche Beschränkungen auferlegen wie die Theorie des symmetrischen dreiphasigen Kurzschlusses, wenn sie sich nicht ins Uferlose verlieren will. Sie muß vor allem den Kurzschlußort ganz dicht an die Sekundärklemmen legen und damit den Einfluß des möglicherweise mitkurzgeschlossenen Leitungstückes ausschließen. Bleibt ihr so lediglich der Klemmenkurzschluß als das zu behandelnde Problem, so muß sie doch noch eine weitere Auswahl treffen. Unter den Klemmenkurzschlüssen ist derjenige der größten Beachtung wert, der das primär speisende Netz elektrisch nicht schwächt. Sich auf ihn beschränkend, hat die Theorie schließlich nur noch den ungeschwächten, satten einphasigen Klemmenkurzschluß des dreiphasigen Transformators vor sich.

Es ist eigentlich drollig, daß die Theorie des dreiphasigen symmetrischen Kurzschlusses ihre ausschließliche Aufmerksamkeit einer einzigen Phase schenkt, daß dagegen die Theorie des einphasigen Kurzschlusses unbedingt alle drei Phasen im Auge behalten muß. Dort kann man mit dem Hilfsbilde eines einphasigen kurzgeschlossenen Transformators anfangen (Abb. 10), hier muß man den ganzen dreiphasigen Transformator im Grundsaltbild (Abb. 26) vor sich haben.

Für die Theorie des dreiphasigen symmetrischen Kurzschlusses ist es bedeutungslos, wie der kurzgeschlossene Transformator primär

und sekundär geschaltet ist. Die Theorie des einphasigen Kurzschlusses muß alle möglichen Schaltungsarten des dreiphasigen Transformators berücksichtigen, wenn sie nichts übersehen will.

Nach all dem müßte man fürchten, daß die Untersuchung des einphasigen Kurzschlusses viel mehr Arbeit verlangen werde als die Untersuchung des dreiphasigen Kurzschlusses. Glücklicherweise handelt es sich bei der Theorie des einphasigen Kurzschlusses des

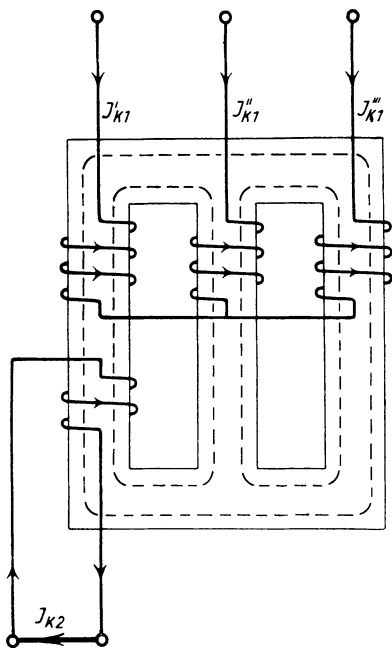


Abb. 26

dreiphasigen Transformators unmittelbar nur um eine Frage. Gelingt es ihr, die Stärke des dauernden Kurzschlußstromes festzulegen, so hat sie eigentlich alles geleistet, was man billigerweise von ihr verlangen kann.

Der Theorie des dreiphasigen Kurzschlusses erscheint der Transformator als eine einfache mit Wirkwiderstand ausgestattete Drosselspule. Eigentlich handelt es sich um drei gleiche Drosselspulen, von denen man jedoch nur eine einzige zu sehen braucht. Der Theorie des einphasigen Kurzschlusses wird sich die einzige kurzgeschlossene Phase des Transformators sicherlich ebenfalls

als eine einfache mit Wirkwiderstand versehene Drosselspule vorstellen. Daß sie dabei ein anderes Gewand anlegen wird, daß sie z. B. einen anderen Blindwiderstand haben wird, als im dreiphasigen Kurzschluß, ist wahrscheinlich. Irgendwie muß doch die Unsymmetrie der Belastung zum Ausdruck kommen.

Sobald es aber feststeht, daß der einphasige Kurzschluß wieder dieselben Größen in den Hauptrollen seiner Erscheinungen auftreten läßt wie der dreiphasige Kurzschluß, kann man alle Ergebnisse der Theorie ganz einfach aus dem Gebiet des dreiphasigen Kurzschlusses in das Gebiet des einphasigen übertragen. Bei dieser

Übertragung kann sich und wird sich die Stärke des dauernden Kurzschlußstroms ändern. Es wird sich wahrscheinlich auch die Geschwindigkeit ändern, mit der der Kurzschlußausgleichsstrom dahinschwindet. Alles andere muß unberührt bleiben.

Für die Größe der Kurzschlußstromwärmegefahr bleibt in allen Kurzschlußfällen die Stärke des Dauerkurzschlußstroms in derselben Weise maßgebend. Für die Größe der Kurzschlußstromkraftgefahr kann neben dem Dauerkurzschlußstrom auch der Ausgleichskurzschlußstrom sehr wichtig werden. Der Aufstieg von der Effektivstärke des dauernden Kurzschlußstroms zur Höchststärke des Kurzschlußgesamtstroms hängt ein wenig von der Zeitkonstanten des Kurzschlußausgleichsstroms ab. Es handelt sich trotzdem fast nur darum, ob der einphasige Kurzschluß einen größeren oder kleineren Dauerkurzschlußstrom hat als der dreiphasige.

24. Der vereinfachte einphasige Kurzschluß. Zusatzstrom und Primärschaltung

Um einen ersten, vorläufigen Einblick in die verwickelten Vorgänge des ungeschwächten einphasigen Klemmenkurzschlusses des dreiphasigen Transformators zu gewinnen, machen wir drei Voraussetzungen, die wir später wieder fallen lassen werden. Die Primärwicklung des Transformators sei in allen ihren drei Phasen ohne Wirk- und ohne Blindwiderstand. Die magnetische Durchlässigkeit des Kerneisens sei über alle Maße groß. Schließlich sei die Umgebung des Eisenkernes für alle magnetischen Kraftlinien, die sich gleichzeitig um primäre und sekundäre Windungen schließen wollen und dabei außerhalb des Kerneisens ihren Weg suchen, vollkommen undurchlässig.

Die erste der drei gemachten Voraussetzungen macht die Widerstände der Sekundärwicklung zu Gesamtwiderständen des Transformators:

$$\begin{aligned} R_2 &= R'', & X_2 &= \omega \cdot L_2 = X_2''; \\ R_1 &= 0, & X_1 &= \omega \cdot L_1 = 0. \end{aligned}$$

Die zweite Voraussetzung erlaubt es, die drei Phasenmagnetisierungsströme zu vernachlässigen. Die Bedeutung der dritten Voraussetzung wird erst im Laufe der folgenden Untersuchungen klar werden. Die drei Annahmen erleichtern gemeinsam das Problem außerordentlich.

In der Primärwicklung müssen die drei vom Hauptkraftfluß des Transformators induzierten Phasenwicklungsgegenspannung ganz

allein dem vom Netz aufgedrückten Spannungsdreieck das Gleichgewicht halten, wenn Widerstandsspannungen nicht helfen können. Offenbar müssen sich in dem durch unsere drei Voraussetzungen vereinfachten einphasigen Kurzschluß genau solche Phasenkraftflüsse bilden wie im Leerlauf. Deshalb hat die kurzgeschlossene Sekundärphase ihre volle Leerlaufspannung zur Verfügung, um mit ihrer Hilfe den Kurzschlußstrom über ihre Widerstände zu treiben.

Es ist also:

$$E_2 = U_2 = I_{k_2} \cdot \sqrt{R''^2 + X''^2},$$

genau so wie im Falle des symmetrischen dreiphasigen Kurzschlusses. Trotzdem gibt es Verwicklungen.

Es gibt im dreiphasigen Eisenkern drei in sich geschlossene Kraftlinienwege. In der Abb. 26 sind diese drei Wege durch je eine Kraftlinie angedeutet. Die drei primären und der eine sekundäre Kurzschlußstrom müssen sich selbstverständlich für alle drei Kraftlinienwege ins magnetische Gleichgewicht stellen. Sonst könnte ja der dreiphasige Hauptkraftfluß primär das Spannungsgleichgewicht nicht aufrechterhalten.

Die drei noch unbekanntenen Phasenkurzschlußströme bezeichnen wir im Einklang mit Abb. 26 mit I'_{k_1} , I''_{k_1} , I'''_{k_1} . Der Wickelsinn sei primär und sekundär derselbe. Jede der drei primären Phasenwicklungen habe w_1 , die kurzgeschlossene sekundäre Phasenwicklung habe w_2 -Windungen.

Es muß dann:

$$\left. \begin{aligned} I_{k_2} \cdot w_2 + I'_{k_1} \cdot w_1 - I''_{k_1} \cdot w_1 &= 0, \\ I_{k_2} \cdot w_2 + I'_{k_1} \cdot w_1 - I'''_{k_1} \cdot w_1 &= 0, \\ I''_{k_1} \cdot w_1 - I'''_{k_1} \cdot w_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (68)$$

sein.

Die drei Gl. (68) sind in Wirklichkeit nur zwei Bestimmungsgleichungen für die drei unbekanntenen primären Phasenkurzschlußströme. Trotzdem erlauben sie die Aufstellung einer bemerkenswerten Lösung. Bezeichnet man nämlich mit I_z einen Primärphasenstrom, dessen effektive Stärke noch vollständig frei wählbar ist, dessen Phase jedoch mit der Phase des sekundären Kurzschlußstromes I_{k_2} übereinstimmt, so kann man:

$$\left. \begin{aligned} I'_{k_1} \cdot w_1 &= I_z \cdot w_1 - I_{k_2} \cdot w_2, \\ I''_{k_1} \cdot w_1 &= I_z \cdot w_1, \\ I'''_{k_1} \cdot w_1 &= I_z \cdot w_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (69)$$

ansetzen und sieht, daß dieser Ansatz das Gleichungstripel (68) befriedigt.

Der einphasige Kurzschluß des dreiphasigen Transformators hat, wie man sieht, seine Eigenheiten. Wohl gibt es primär in jener Phase, die sekundär kurzgeschlossen wurde, einen Kurzschlußstrom:

$$I_{k_1} = -I_{k_2} \cdot \frac{w_2}{w_1},$$

genau so, wie im dreiphasigen symmetrischen Kurzschluß. Daneben gibt es jedoch in allen drei Primärphasen einen zusätzlichen Kurzschlußstrom I_z , der merkwürdigerweise für alle drei Phasen gleich groß und von gleicher Phase ist. Der eigentliche primäre Kurzschlußstrom I_{k_1} hat natürlich die Gegenphase des sekundären Kurzschlußstroms I_{k_2} .

Welche Rolle spielt nun der geheimnisvolle Zusatzkurzschlußstrom I_z ? Für das magnetische Gleichgewicht der drei Eisenkraftlinienwege nach Abb. 26 ist er bedeutungslos, wie leicht ersichtlich. Er stellt jedoch einem Kraftfluß, der alle drei Säulen entlang fließen und sich von Joch zu Joch durch die Luft den Rückweg bahnen würde (Abb. 27) auf jeder Säule eine erregende Durchflutung $I_z \cdot w_1$ zur Verfügung.

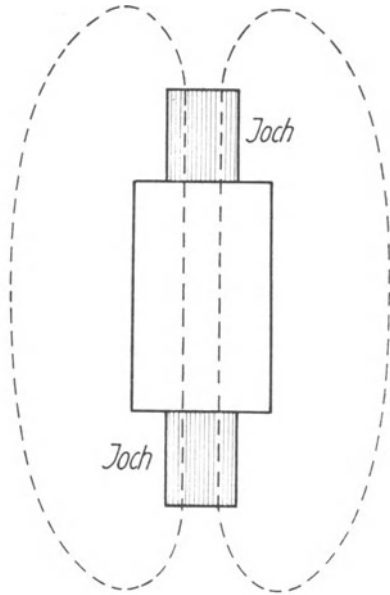


Abb. 27

Jetzt ist es klar, warum wir das Problem durch die Annahme, daß der in Abb. 27 angedeutete Kraftlinienweg gesperrt ist, vereinfacht haben. Die Verwicklungen, die der einphasige, in drei gleiche parallele Zweige gespaltene Zusatzkraftfluß des Zusatzstroms I_z bringt, sollten vorläufig unterdrückt werden.

Es liegt nahe, anzunehmen, daß der unterdrückte einphasige Zusatzkraftfluß des einphasigen Kurzschlusses eine außerordentlich

wichtige Rolle zu spielen berufen ist. Der primäre Zusatzstrom I_z kann doch unmöglich vollkommen frei seine Stärke wählen. Er muß offenbar mit seinem in Wirklichkeit doch bestehenden Zusatzkraftfluß irgendwo anstoßen, wenn er sonst nicht durch irgendeine andere Bindung seinen richtigen Platz zugewiesen bekommt.

Es gibt eine Bindung, die I_z sofort festlegt, wenn sie vorhanden ist. Die drei Primärphasen des Transformators können in Stern ohne Nulleiter zusammengeschlossen sein. In diesem Falle muß natürlich die Gleichung:

$$I'_{k_1} + I''_{k_1} + I'''_{k_1} = 0 \dots \dots \dots (70)$$

erfüllt sein. Sofort ergibt sich aus dem Gleichungstripel (69):

$$I_z \cdot w_1 = \frac{I_{k_2} \cdot w_2}{3} \dots \dots \dots (71)$$

In diesem Falle ist:

$$\left. \begin{aligned} I'_{k_1} \cdot w_1 &= -\frac{2}{3} \cdot I_{k_2} \cdot w_2, \\ I''_{k_1} \cdot w_1 &= \frac{1}{3} \cdot I_{k_2} \cdot w_2, \\ I'''_{k_1} \cdot w_1 &= \frac{1}{3} \cdot I_{k_2} \cdot w_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (69 a)$$

der primäre Kurzschlußstrom erreicht nur noch zwei Drittel der Stärke, die ihm im dreiphasigen symmetrischen Kurzschluß bestimmt ist.

Es ist klar, daß weder die primäre Sternschaltung mit Nulleiter, noch die primäre Dreieckschaltung imstande sind, auf dieselbe Weise den Zusatzstrom I_z festzunageln, wie es die Sternschaltung ohne Nulleiter tut. Sind also diese beiden Schaltungsarten unbrauchbar oder sehen wir erst einen Teil der Erscheinungen des einphasigen Kurzschlusses?

Wir haben ein vorläufiges Bild vor uns, weil wir es an drei Voraussetzungen gebunden haben. Diese Voraussetzungen müssen jetzt gelockert werden. Es ist zwar unwahrscheinlich, daß die Vernachlässigung der Phasenmagnetisierungsströme das Bild des einphasigen Kurzschlusses wesentlich verunstaltet. Sicherlich jedoch hat die Nichtbeachtung der primären Wicklungswiderstände schwerwiegende Folgen. Bestimmt ist schließlich der vorläufig unterdrückte einphasige Zusatzkraftfluß die Waffe, mit der sich der dreiphasige,

eigentlich nur für symmetrische Belastungen gebaute Transformator gegen aufgezwungene Unsymmetrien wehrt.

Wir wollen den Zusatzkraftfluß trotzdem noch aus unseren Bildern ausschalten. Von den drei am Anfang dieses Abschnittes eingeführten vereinfachenden Voraussetzungen wollen wir jetzt nur diejenige fallen lassen, die die drei Primärphasen widerstandslos macht. In der Theorie des Beleuchtungstransformators mag diese Voraussetzung nur eine geringe Bedeutung haben. Im Kurzschluß sind jedoch die Wicklungswiderstände außerordentlich wichtig. Wir setzen also von nun an sowohl primär als auch sekundär Wirk- und Blindwiderstände voraus, und zwar dieselben Wirk- und Blindwiderstände, die in der Theorie des dreiphasigen symmetrischen Kurzschlusses in ihren wichtigen Rollen aufgetreten sind.

25. Nullpunktverschiebung im einphasigen Kurzschluß

Wenn im einphasigen Kurzschluß des dreiphasigen Transformators in den drei Primärphasen neben den Wicklungsgegenspannungen auch noch Widerstandsspannungen auftreten, brauchen die drei Phasenkraftflüsse nicht mehr ihre volle Leerlaufstärke zu haben. Sie werden voraussichtlich auch nicht mehr alle drei gleich stark sein können, denn wir erwarten in den drei Primärphasen keineswegs gleich große und auch nicht um je 120° gegeneinander phasenverschobene Widerstandsspannungen.

Wie immer nun der notwendige dreiphasige Hauptkraftfluß des einphasigen Kurzschlusses aufgebaut sein mag, die ihn erregenden drei Phasenmagnetisierungsströme treten in dem nun zu entwerfenden Bilde nicht auf, weil wir uns entschlossen haben, sie zu vernachlässigen. Deshalb müssen wir wiederum mit dem magnetischen Gleichgewicht der primären und des sekundären Kurzschlußstromes rechnen. Das Gleichungstripel (69) besteht also immer noch zu Recht.

Nun müssen wir daran gehen, den Einfluß der primären Wicklungswiderstände zu bestimmen. Zu diesem Zwecke beschränken wir uns vorläufig auf die primäre Sternschaltung ohne Nulleiter, weil wir für diesen Sonderfall den sonst störenden primären Zusatzstrom bereits berechnet haben. Wir können demnach zunächst von den Gleichungen (69a) ausgehen.

Die anzustellende Untersuchung hat als Ausgangspunkt das Spannungsdreieck U_1' , U_1'' , U_1''' vor sich, das vom Netz dem Transformator aufgedrückt wird. Bei Abwesenheit der primären Widerstandsspannungen würde der Hauptkraftfluß die drei Wicklungsgegenspannungen E_1' , E_1'' , E_1''' (Abb. 28) induzieren. Nun gibt es zunächst in allen drei Primärphasen die gleich großen und phasengleichen Widerstandsspannungen:

$$\Delta e_z = I_z \cdot \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \frac{1}{3} \cdot I_{k_2} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \sqrt{R_1^2 + X_1^2}.$$

Den Phasenwicklungsgegenspannungen helfend, verschieben diese drei Widerstandsspannungen lediglich das aufgedrückte Spannungsdreieck, ohne es zu verunstalten, ohne es zu verkleinern oder zu

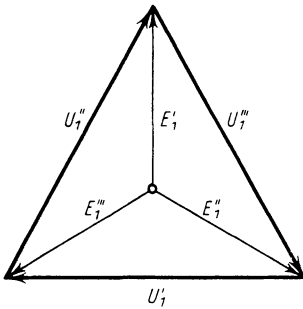


Abb. 28

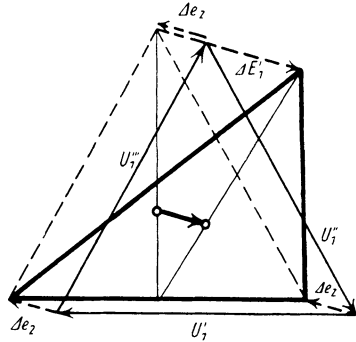


Abb. 29

vergrößern und überlassen es dann dem Hauptkraftfluß. Offenbar könnte der Hauptkraftfluß so bleiben, wie er im Leerlauf ist, wenn es nicht in der verunglückten Phase noch eine primäre Widerstandsspannung geben würde. Diese nur in einer Primärphase auftretende Widerstandsspannung ist, wie es die erste Gleichung des Tripels (69a) fordert, dreimal größer als Δe_z und hat deren Gegenphase.

$$\Delta E_1' = -3 \cdot \Delta e_z.$$

So kommt es, daß der Hauptkraftfluß doch ein verzerres Spannungsdreieck (Abb. 29) aufgedrückt bekommt, wenn das ursprüngliche, U_1' , U_1'' , U_1''' , gleichseitig war. Wie es mit diesem verunstalteten Spannungsdreieck fertig wird, ist ein Problem, dessen Lösung bekannt ist.

Der dreiphasige Eisenkern verlangt von den drei Phasenkraftflüssen Φ' , Φ'' , Φ''' die Beachtung des Umstandes, daß es keinen magnetischen Nulleiter gibt. Das entspricht der Bedingungsgleichung:

$$\Phi' + \Phi'' + \Phi''' = 0 \dots \dots \dots (72)$$

Sie ist erfüllt, wenn der Nullpunkt des vom Hauptkraftfluß induzierten Spannungssystems mit dem Schwerpunkt des zu bewältigenden Spannungsdreiecks zusammenfällt (Abb. 29).

Nachdem nun die Widerstandsspannung $\Delta E'_1$ einen Eckpunkt des ursprünglichen, jedoch von den Widerstandsspannungen Δe_z parallel zu sich selbst verschobenen Spannungsdreiecks verrückt hat, muß der Schwerpunkt, mit ihm aber auch der Nullpunkt des Dreiecks wandern. Daß er um $1/3 \cdot \Delta E'_1$ verlegt werden muß, ist aus Abb. 29 sofort ersichtlich. Daß die Wicklungsgegenspannung der verunglückten Phase auf diese Weise schließlich um $2/3 \cdot \Delta E'_1$ kleiner wird als im Leerlauf, bzw. als bei Nichtvorhandensein primärer Wicklungswiderstände ist klar.

Der primär in Stern ohne Nulleiter geschaltete Transformator hat, wenn sich die primären Zusatzströme I_z aller drei Phasen magnetisch nicht bemerkbar machen können, im einphasigen Kurzschluß eine kleinere Kurzschlußspannung als im dreiphasigen Kurzschluß. Der Unterschied entspricht dem Umstand, daß in der verunglückten Phase primär nur zwei Drittel der Wicklungswiderstände zur Geltung kommen und läßt sich durch das Verhältnis:

$$\frac{\left[\frac{2}{3} \cdot R_1 + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot R_2 \right]^2 + \left[\frac{2}{3} \cdot X_1 + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot X_2 \right]^2}{\left[R_1 + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot R_2 \right]^2 + \left[X_1 + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot X_2 \right]^2}$$

ausdrücken.

Das verfeinerte, allerdings nur für eine bestimmte Schaltung gültige Bild des einphasigen Kurzschlusses, das wir entworfen haben, lenkt die Aufmerksamkeit auf die Art und Weise, in der der für symmetrische Belastungen gebaute dreiphasige Transformator mit der ihm aufgezwungenen Unsymmetrie kämpft: Er verschiebt den Nullpunkt des dreiphasigen Systems.

Was würde er indessen unternehmen, wenn man ihm primär den Nulleiter geben, wenn man ihm also den Nullpunkt festnageln würde ?

Wie würde er sich wehren, wenn man seine Primärphasen in Dreieckschaltung zusammenschließen würde?

Der verschiebbare Nullpunkt der Sternschaltung ohne Nulleiter entspricht zweifellos dem Freiheitsgrad dieser Schaltung, der vorhanden sein muß, damit Belastungsunsymmetrien überhaupt zulässig, überhaupt möglich werden. Daß ein Freiheitsgrad genügt, haben wir soeben gesehen. Deshalb darf die Sternschaltung ohne Nulleiter den Zusatzstrom I_z ein für allemal festlegen.

Dieses Recht fehlt sowohl der Sternschaltung mit Nulleiter, die einen festgenagelten, und der Dreieckschaltung, die keinen Nullpunkt hat. Trotzdem brauchen beide Schaltungen ebenfalls je einen Freiheitsgrad, um mit den Belastungsunsymmetrien fertig werden zu können. Sie besitzen ihn offenbar in der Einstellbarkeit des primären Zusatzstroms I_z . Deshalb und nur deshalb ist für sie im Gleichungstriplett (69) I_z frei beweglich.

Welche Rolle muß nach all dem I_z im einphasigen Kurzschluß des dreiphasigen Transformators übernehmen, wenn primär Sternschaltung mit Nulleiter oder Dreieckschaltung vorliegt? Er muß dem Hauptkraftfluß helfen, der ein gleichseitiges aufgedrücktes Spannungsdreieck erwartet, in Wirklichkeit jedoch ein von der primären Widerstandsspannung der verunglückten Phase verunstaltetes vorgesetzt bekommt.

Der Zusatzstrom I_z kann allerdings dem Hauptkraftfluß nur dann helfen, wenn er sich magnetisch auswirken kann, wenn er also einen einphasigen Zusatzkraftfluß erregen kann. Die Voraussetzung, daß dies unmöglich ist, war am Anfang unserer Untersuchungen des einphasigen Kurzschlusses nützlich und zulässig. Sie ist jetzt unhaltbar geworden. Sie würde ja verlangen, daß I_z über alle Maße hinaus wachsen muß, um mit der vorausgesetzten magnetischen Undurchlässigkeit des das Kerneisen umgebenden Raumes doch noch fertig werden zu können.

Damit ist ein tiefer Einblick in das Wesen des dreiphasigen Transformators gewonnen. Es ist ein Glück, daß sich der so überflüssig scheinende, zusätzliche, einphasige Kraftfluß vom Joch zum Joch schließen kann, daß ihm der Weg außerhalb des Kerneisens nicht gesperrt ist. Der einphasige Zusatzkraftfluß des dreiphasigen Transformators ist die Brücke, die das Gebiet der symmetrischen dreiphasigen mit dem Gebiet der unsymmetrischen Belastungen verbindet.

26. Zusatzkraftfluß. Jochinduktivität

Zwischen den den einphasigen Zusatzkraftfluß erregenden drei Zusatzdurchflutungen $I_z \cdot w_1$ und dessen Kraftlinienzahl Φ_z steht der magnetische Widerstand R_z des Zusatzkraftflussweges. Er ist zweifellos eine wichtige, leider auch eine schwer faßbare Größe. Der Kraftlinienweg von Joch zu Joch durch die Luft macht große Berechnungsschwierigkeiten. Man darf ferner nicht vergessen, daß sich in der nahen Umgebung des Eisenkernes auch anderes Eisen befindet. Die Ölkesselwände sind da, neben ihnen das Traggerüst des Transformators.

Der Kurzschluß bringt noch weitere Verwicklungen. Der einphasige Zusatzkraftfluß mag im normalen Lichtbetrieb neben dem Hauptkraftfluß eine bescheidene Erscheinung sein, so daß er auf seinem Wege durch die drei Säulen den Hauptkraftfluß kaum stört. Im Kurzschluß dagegen ist er sicherlich vielfach stärker, während der Hauptkraftfluß stark geschwächt weiterarbeitet. Daraus ergeben sich im Säuleneisen selbst Schwierigkeiten, die kaum vernachlässigbar sind.

Es empfiehlt sich trotzdem, zunächst den magnetischen Widerstand R_z nur auf dem Luftwege von Joch zu Joch zu suchen. Einerseits drängt sich zweifellos je die Hälfte dieses Widerstandes auf dem Kraftlinienaus- bzw. Eintritt aus dem bzw. ins Joch zusammen, so daß benachbarte Eisenteile des Kessels und des Traggerüstes doch nur wenig Einfluß haben können. Andererseits kann man den Kampf des Zusatzkraftflusses mit dem Hauptkraftfluß im Säuleneisen erst dann berücksichtigen, wenn man Größe und Phase des Zusatzkraftflusses bereits bestimmt hat.

So kommt man zu der angenäherten Berechnung von R_z , die der Verfasser (L. 1, S. 46) angegeben hat und die wegen ihrer Einfachheit hier wiederholt werden darf.

Oberhalb und unterhalb einer Säule denken wir uns aus den beiden Jochen je einen eisernen Würfel herausgeschnitten. Aus der Oberfläche des einen Würfels tritt das der Säule gehörige Drittel des Zusatzkraftflusses heraus, um nach Durchquerung der Luft in die Oberfläche des anderen Jochwürfels einzutreten. Die Kante des Jochwürfels betrage a Zentimeter (Abb. 30).

Die Würfeloberfläche weicht als magnetische Äquipotentialfläche sicherlich nach und nach einer Kugeloberfläche. In der Entfernung

x (cm) vom Würfelmittelpunkt stehen demnach den Kraftlinien bereits $4 \pi x^2$ Quadratcentimeter zur Verfügung. Der etwas rohe Ansatz für die Berechnung des magnetischen Widerstandes in der Umgebung des einen Jochwürfels lautet:

$$\int_{\frac{a}{\sqrt{2}}}^{\infty} \frac{dx}{4 \cdot x^2 \cdot \pi} = \frac{\sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot a}$$

Das Ergebnis bestätigt die oben aufgestellte Behauptung, daß sich der magnetische Widerstand des Zusatzkraftflusses in der nächsten Umgebung der Jochoberflächen zusammendrängt. Es ist indessen noch verbesserungsbedürftig. Die der Säule zugekehrte Würfelfläche tut offenbar nicht mit. Diejenigen Würfelflächen, die Jochschnittflächen sind, vermitteln die Ausbreitung des Zusatzkraftflusses über die Oberfläche des nicht in den sechs Würfeln steckenden Jocheisens. Sie tun mit. Wie, ist nicht leicht zu sagen.

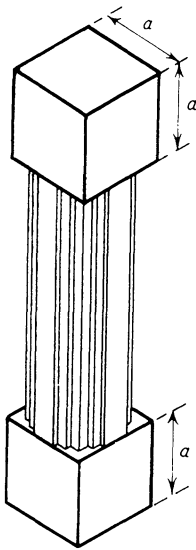


Abb. 30

Wir stellen sie doch voll in die Rechnung, so daß von den sechs Würfelflächen fünf vollwertige bleiben. Außerdem drücken wir die Würfelfkante a durch den Säulendurchmesser d (cm) aus. So ergibt sich schließlich der auf eine Säule entfallende magnetische Widerstand des Zusatzkraftflusses mit:

$$a \doteq 0,8 \cdot d$$

zu:

$$3 \cdot R_z = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot d} \cdot \frac{6}{5} \doteq \frac{1}{3 \cdot d}$$

und der magnetische Gesamtwiderstand des Zusatzkraftflusses:

$$R_z \doteq \frac{1}{9 \cdot d} \dots \dots \dots (73)$$

In einem Aufsatz (L. 8, S. 34) unternahm F. Ollendorff einen Ausbau der Zusatzkraftflußtheorie. Seine, mit einem erheblichen mathematischen Aufwand durchgeführten Rechnungen führen zu

einer Formel für den lediglich vom Zusatzkraftfluß herrührenden induktiven Widerstand einer in Dreieck, d. h. in sich geschlossenen, den ganzen Zusatzkraftfluß umschlingenden Primärwicklung des Transformators. Diese Gesamtwicklung hat natürlich die dreifache Windungszahl einer Primärphasenwicklung:

$$w_r = 3 \cdot w_1 \dots \dots \dots (74)$$

Ollendorff braucht neben dieser Primärgesamtwindungszahl nur noch die Jochlänge l_j , die er, in Metern gemessen, einführt. Seine Formel lautet dann auf 50 Perioden zugeschnitten:

$$X_j = 0,75 \cdot \left(\frac{w_r}{100}\right)^2 \cdot l_j \text{ (meter) Ohm} \dots \dots \dots (75)$$

Sie soll für Überschlagsrechnungen sehr verwendbar sein.

Es liegt natürlich nahe, das vom Verfasser mit ganz einfachen Mitteln errechnete Ergebnis der Gl. (73) mit der Formel der Gl. (75) zu vergleichen. Die Wichtigkeit des Zusatzkraftflusses für die Theorie unsymmetrischer Belastungen dreiphasiger Transformatoren rechtfertigt dieses Verweilen beim magnetischen Widerstand R_z .

Die eigenartige Verkettung des einphasigen Zusatzkraftflusses mit der in Dreieck geschlossenen dreiphasigen Wicklung berücksichtigt man bei der anzustellenden Vergleichsrechnung am einfachsten so, daß man den vom Zusatzkraftfluß herrührenden induktiven Widerstand X_z einer Primärphase ins Auge faßt. Es ist dann:

$$X_z = \frac{X_j}{3} \dots \dots \dots (76)$$

Stehen nun für die Erregung des Zusatzkraftflusses in jeder Phase $I_z \cdot w_1$ Amperewindungen zur Verfügung, so hat man nach Gl. (73):

$$\Phi_z = \frac{4 \cdot \pi}{10} \cdot I_z \cdot w_1 \cdot 9 \cdot d \dots \dots \dots (77)$$

Kraftlinien zu erwarten und ein Drittel davon ist mit den w_1 -Windungen einer Phase verkettet. So ergibt sich die Zusatzinduktivität einer Phase zu:

$$L_z = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Phi_z}{I_z} \cdot w_1 \cdot 10^{-8} = \frac{4 \cdot \pi}{10} \cdot w_1^2 \cdot 3 \cdot d \cdot 10^{-8} \text{ Henry} \dots (78)$$

und schließlich:

$$X_z = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{4 \cdot \pi}{10} \cdot w_1^2 \cdot 3 \cdot d \cdot 10^{-8},$$

was man auch in der Form:

$$X_j = 3 \cdot X_z = \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot 36 \cdot d_{(\text{meter})} = \left(\frac{w_r}{100}\right)^2 \cdot 4 \cdot d_{(\text{meter})} \text{ Ohm (79)}$$

schreiben kann, wenn man den Säulendurchmesser d in Metern gemessen einsetzt.

Bei dreiphasigen Transformatoren ist durchwegs:

$$l_j > 4 \cdot d.$$

Gl. (79) kommt somit der Ollendorffschen Formel (75) sehr nahe. Sie liefert eine etwas größere „Jochinduktivität“, aber der Unterschied ist geringfügig. In der Folge wollen wir deshalb an der Berechnungsgleichung (79) festhalten.

Für das Problem des einphasigen Kurzschlusses des dreiphasigen Transformators ist die relative Größe des zusätzlichen induktiven Widerstandes, d. h. das Verhältnis des zusätzlichen zum normalen induktiven Gesamtwiderstand einer Transformatorphase, fast noch wichtiger als die absolute. Sie ergibt sich sofort aus dem Vergleich der magnetischen Widerstände des Zusatzkraftflusses einer Säule und des Gesamtstreufusses einer Phase.

Mit:

h als Säulenlänge (cm),

U_m als mittleren Windungslänge (cm) und

δ' als reduzierten Spaltbreite (cm),

wobei, wie bekannt, der Abb. 17 entsprechend:

$$\delta' = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

ist, bekommt man — von der Primärseite aus gesehen:

$$\frac{X_z}{X_1 + \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \cdot X_2} = \frac{h \cdot 3 \cdot d}{U_m \cdot \delta'} \dots \dots \dots (80)$$

Zweifellos ist U_m immer größer als $3 \cdot d$. Andererseits ist h immer vielfach größer als δ' . Der zusätzliche induktive Widerstand ist vielfach, ganz leicht zehnmal, größer als der normale. Allerdings

ist die Zusatzbelastungsdurchflutung immer erheblich kleiner als die normale. Wenn sie aber im einphasigen Kurzschluß des primär in Stern ohne Nulleiter geschalteten Transformators einem Drittel der eigentlichen Belastungsdurchflutung gleichkommt, muß die Zusatzgegenspannung doch viel größer werden als die induktive Widerstandsspannung der Wicklung.

27. Einphasiger Kurzschluß und primäre Sternschaltung ohne Nulleiter

Ein grobes, aber außerordentlich klares Bild des einphasigen Kurzschlusses eines primär in Stern ohne Nulleiter geschalteten dreiphasigen Transformators erhält man mit Hilfe der bereitgestellten Lösungen der bisher behandelten Teil- und Hilfsprobleme, wenn man die normalen Wirk- und Blindwiderstände sowohl der Primär- als auch der Sekundärwicklung vernachlässigt.

Beim dreiphasigen Kurzschluß würde die Vernachlässigung der Wicklungswiderstände zu unendlich starken Strömen führen und deshalb ein wertloses Beginnen vorstellen. Im einphasigen Kurzschluß hat die Vergrößerung des Bildes einen bedeutenden Wert. Neben den normalen Wicklungswiderständen greift ja, wie wir bereits wissen, im einphasigen Kurzschluß auch noch der zusätzliche, vom einphasigen Zusatzkraftfluß herrührende induktive Wicklungswiderstand ein. Wir konnten feststellen, daß dieser Zusatzwiderstand den normalen induktiven und deshalb erst recht den Ohmschen Wicklungswiderstand stark in den Schatten drückt. Nimmt man an, daß er allein vorhanden ist, so begeht man keinen allzu großen Fehler. Wohl aber erkaufte man sich damit ungemein klare Einblicke in die Geheimnisse des einphasigen Kurzschlusses.

Es ist vor allem klar, daß die kurzgeschlossene Phase sekundärspannungslos sein muß, die geringste Spannung an den Sekundärklemmen würde ja theoretisch einen unendlich starken Kurzschlußstrom bedeuten. Nun gibt es beim Fehlen der eigentlichen Wicklungswiderstände in der kurzgeschlossenen Sekundärphase sowohl die vom Hauptkraftfluß als auch die vom einphasigen Zusatzkraftfluß induzierte Spannung. Diese beiden Spannungen müssen somit gleich groß und gegeneinander gerichtet sein.

Nach Abb. 31 verschiebt der Zusatzkraftfluß das aufgedrückte Spannungsdreieck ohne es zu verzerren und der Hauptkraftfluß faßt

es mit einem Gegenspannungstern, dessen Nullpunkt mit dem Schwerpunkt des aufgedrückten Spannungsdreiecks zusammenfallen muß, an. Daraus folgt sofort, daß sowohl der Haupt- als auch der Zusatzkraftfluß die volle Phasenspannung des aufgedrückten Systems induzieren müssen.

Beträgt diesmal die aufgedrückte verkettete Spannung $13 \cdot U_1$ Volt und bezeichnet man die gesuchte Stärke des vom Zusatzstrom befreiten primären Kurzschlußstroms mit I_{k_1} , so bekommt man den Ansatz:

$$U_1 = X_z \cdot \frac{I_{k_1}}{3},$$

weil der Zusatzkraftfluß nur von einem Drittel des Kurzschlußstroms erregt wird.

Holt man den Wert X_z aus der Gleichung (79) heran und rechnet mit der Primärwindungszahl w_1 einer Phase statt mit $w_r = 3 \cdot w_1$, so bekommt man:

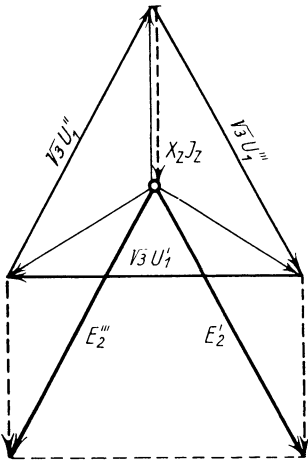


Abb. 31

$$I_{k_1} = \frac{U_1}{\left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot 4 \cdot d_{(meter)}} \text{ Amp.} \quad (80)$$

Führt man in Gl. (80) noch die Windungsspannung e (Volt) des leerlaufenden Transformators ein, wobei natürlich:

$$U_1 = e \cdot w_1$$

ist, so bekommt man schließlich die Kurzschlußwicklungsdurchflutung der betroffenen Phase zu:

$$I_{k_1} \cdot w_1 = D_k = \frac{e \cdot 10^4}{4 \cdot d_{(meter)}} \text{ Amperewindungen} \dots (81)$$

Will man wissen, wievielmals die Durchflutung im einphasigen Kurzschluß eines N -kVA-Transformators größer ist als die Nennleistungsdurchflutung D_n , so braucht man nur:

$$N \cdot 10^3 = 3 \cdot e \cdot D_n$$

anzusetzen und erhält sofort:

$$\xi = \frac{D_k}{D_n} = 7,5 \frac{e^2}{N_{(kVA)} \cdot d_{(meter)}} \dots \dots \dots (82)$$

Beispiel. Ein dreiphasiger 100-kVA-Transformator habe eine Windungsspannung von 4,5 Volt und einen Säulendurchmesser von 160 mm.

Für:

$$e = 4,5 \text{ Volt,}$$

$$N = 100 \text{ kVA,}$$

und

$$d = 0,16 \text{ Meter}$$

bekommt man nach Gl. (82):

$$\xi = 7,5 \cdot \frac{4,5^2}{100 \cdot 0,16} = 9,5.$$

Der einphasige Kurzschlußstrom würde demnach den Vollaststrom 9,5mal übertreffen.

Es ist höchst bemerkenswert, daß mit steigender Leistung der einphasige Kurzschlußstrom an Bedeutung verliert. Die Leistung des Transformators wächst bekanntlich bei festgehaltenen elektromagnetischen Beanspruchungen der Baustoffe (Kupfer und Eisen) mit der vierten Potenz der linearen Abmessungen. Die Windungsspannung wächst dabei mit dem Quadrat des Säulendurchmessers. Mit einer Konstanten k kann man also schreiben:

$$\xi = \frac{k}{d} \dots \dots \dots (83)$$

Es gibt — theoretisch wenigstens — sehr große Leistungen, denen der einphasige Kurzschluß keine Überlast bedeutet. Es ist zwar richtig, daß auch der dreiphasige Kurzschlußstrom einem Wachstumsgesetz folgt, das dem der Gl. (83) sehr nahe kommt. Man darf indessen den normalen induktiven Wicklungswiderstand, der für den dreiphasigen Kurzschlußstrom maßgebend ist, nicht ungebührlich groß werden lassen, weshalb das Gesetz des natürlichen Wachstums dieses Widerstandes mit künstlichen Mitteln außer Kraft gesetzt wird, wenn es zu stören beginnt. Der zusätzliche induktive Widerstand der einphasigen Belastungen stört bei symmetrischen Belastungen in keiner Weise, er darf deshalb ungehindert seinem Wachstumsgesetz folgen. Deshalb hat der einphasige Kurzschlußstrom neben dem dreiphasigen eine um so geringere Bedeutung, je größer der Transformator ist.

28. Einphasiger Kurzschluß und primäre Sternschaltung mit Nulleiter bzw. primäre Dreieckschaltung

Das Bild des einphasigen Kurzschlusses, das im vorangehenden Abschnitt unter Berücksichtigung des einphasigen Zusatzkraftflusses entworfen wurde, vernachlässigt die Wicklungswiderstände. Darüber hinaus gilt es nur für den Fall der primären Sternschaltung ohne Nulleiter. Trotz des sehr eingeschränkten Gültigkeitsbereiches und trotz der nicht zu übersehenden Ungenauigkeit ist es jedoch für das Problem des einphasigen Kurzschlusses in dessen vollem Umfang ungemein wichtig.

Der Eingriff des einphasigen Zusatzkraftflusses in die Kurzschlußerscheinungen ist in diesem Bilde außerordentlich klar dargestellt.

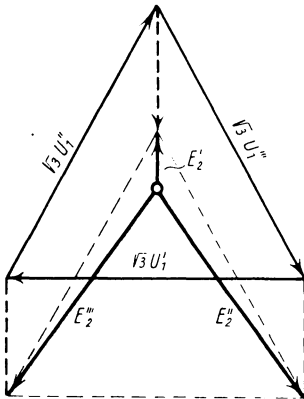


Abb. 32

Die Rolle des Zusatzkraftflusses kann nun nicht anders werden, wenn die Primärschaltung geändert wird. Der Zusatzkraftfluß kann mehr oder weniger hervortreten, wenn der ihn erregende Zusatzstrom I_2 , den Bedürfnissen der jeweiligen Schaltung folgend, stärker oder schwächer werden muß. Seine Folgeerscheinungen bleiben in ihrem Wesen immer dieselben.

Wie sind nun diese Folgeerscheinungen? Der Zusatzkraftfluß verkleinert die sekundäre Phasenspannung der vom Kurzschluß betroffenen Phase und vergrößert die beiden übrigen

Phasenspannungen. Gäbe es keine eigentlichen Wicklungswiderstände, so würde der Zusatzkraftfluß, wie im vorangehenden Abschnitt festgestellt, den Nullpunkt des Sekundärspannungsdreiecks ganz in den vom Unglück betroffenen Eckpunkt des Dreiecks schieben. In Wirklichkeit gelingt ihm dies nicht ganz, die eigentlichen Wicklungswiderstände brauchen doch noch einen Rest der Phasenspannung in der kurzgeschlossenen Sekundärphase (Abb. 32).

Der Zusatzkraftfluß ist im Falle der primären Sternschaltung ohne Nulleiter sichtlich bestrebt, das Unglück zu verkleinern. Deshalb ergab Gl. (82) verhältnismäßig bescheidene Kurzschlußstromstärken. In Wirklichkeit gibt sie natürlich obere Grenzwerte an. Die

Mitwirkung der eigentlichen Wicklungswiderstände drückt die Stärke des einphasigen Kurzschlußstroms noch tiefer hinunter.

Die Sternschaltung ohne Nulleiter ist die weitaus häufigste Primärschaltung des dreiphasigen Transformators. Sie nimmt dem einphasigen Kurzschlußstrom neben dem dreiphasigen jede praktische Bedeutung. Das Stromkraft- und das Stromwärmeproblem des einphasigen Kurzschlusses sind für den Fall der primären Sternschaltung ohne Nulleiter bereits gut und ausgiebig gelöst.

Man kann sich, wenn man das im vorangehenden Abschnitt entworfene grobe Bild des einphasigen Kurzschlusses nochmals betrachtet, auf den Standpunkt stellen, daß der Hauptkraftfluß in seiner vollen Leerlaufstärke auftritt, daß also die verunglückte Sekundärphase ihre volle Windungsspannung bekommt, daß jedoch die Jochinduktivität diese Spannung vollständig verbraucht. Man sieht unter diesem Gesichtswinkel einen besonderen Blindwiderstand auftreten, den der symmetrisch belastete Transformator nicht kennt, einen Blindwiderstand, der den normalen in den Schatten stellt, sich jedoch in Wirklichkeit mit ihm jeweils verbündet, um den sekundären Kurzschlußstrom zu drücken.

Diese Betrachtungsweise klärt das durch keine besondere Primärschaltung eingeschränkte Problem des einphasigen Kurzschlusses erheblich: Jedesmal, wenn der Zusatzkraftfluß auftritt, wird der eigentliche Blindwiderstand der Transformatorwicklung verstärkt. Das Verstärkungsmaß hängt in eigentümlicher Weise von der Stärke des primären Zusatzstroms I_z ab. Bei der primären Sternschaltung ohne Nulleiter entspricht die Phasendurchflutung $I_z \cdot w_1$ des Zusatzstroms einem Drittel der Sekundärdurchflutung. Ein Drittel der durch Gl. (79) bestimmten Jochinduktivität X_z tritt deshalb der eigentlichen Wicklungsinduktivität X'' zur Seite. Stärkere oder schwächere Zusatzströme I_z , die ja bei anderer Primärschaltung möglich sind, stärken oder schwächen proportional die zusätzliche Induktivität.

Folgert man daraus, daß der einphasige Kurzschluß immer weniger gefährlich wird, je stärker I_z wird, so hat man praktisch Recht, darf jedoch nicht vergessen, daß es neben der Größe des Zusatzstroms I_z auch seine Phase gibt. Bei der primären Sternschaltung ohne Nulleiter ist I_z in Phase mit dem sekundären Kurzschlußstrom. Dieser Fall verspricht also eine reine Addition der eigentlichen und der zusätzlichen Induktivität. Die reine Addition

bleibt erhalten, wenn bei anderen Primärschaltungen I_z seine Größe ändert, seine Phase jedoch beibehält. Kann er sie beibehalten?

Sehen wir uns den Fall der primären Sternschaltung mit Nulleiter an. Das aufgedrückte Spannungsdreieck U'_1, U''_1, U'''_1 (Abb. 33) hat in diesem Falle einen festgenagelten Nullpunkt. Die primäre Widerstands-

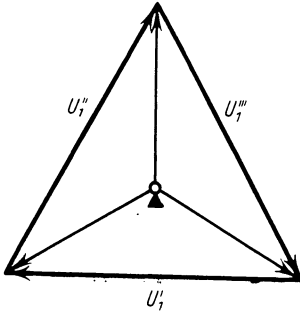


Abb. 33

$$\Delta E_1 = I_{k1} \cdot \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$$

verschiebt dem Hauptkraftfluß einen Eckpunkt des Dreiecks. Um mit dieser Verschiebung fertig zu werden, müßte, wie wir bereits wissen, der Hauptkraftfluß den Nullpunkt um $\frac{1}{3} \cdot \Delta E_1$ verrücken. Er kann es nicht. Folglich muß der Zusatzkraftfluß alle drei Eck-

punkte des aufgedrückten Spannungsdreiecks um $-\frac{1}{3} \cdot \Delta E_1$ verschieben (Abb. 34). Sofort folgt aus dieser Feststellung:

$$I_z \cdot X_z = -\frac{1}{3} \cdot \Delta E_1 \dots \dots \dots (84)$$

Genau das gleiche Bild bekommt man, wenn man den Fall der primären Dreieckschaltung untersucht. Die primäre Widerstands-

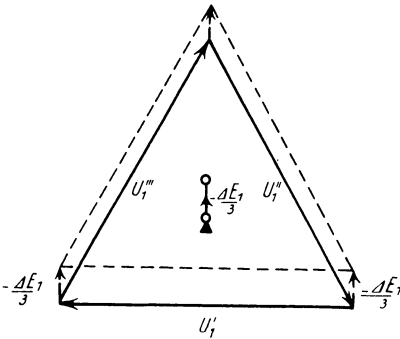


Abb. 34

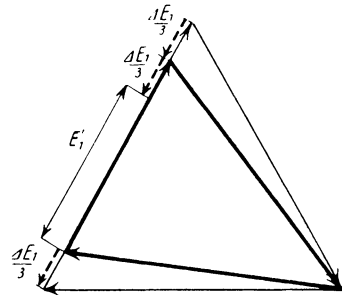


Abb. 35

spannung der verunglückten Phase öffnet das Spannungsdreieck an einem Eckpunkt und der Hauptkraftfluß kann es, auf sich allein angewiesen, nicht schließen (Abb. 35). Das besorgt der Zusatzkraftfluß, indem er sich wiederum der Gl. (84) unterwirft.

Man entdeckt sowohl bei der Sternschaltung mit Nulleiter als auch bei der Dreieckschaltung eine Phasenverschiebung des Zusatzstroms I_z , der nicht in Gegenphase mit I_{k_1} sein kann — R_1 stört — gegen den sekundären Kurzschlußstrom. Viel hat diese Phasenverschiebung nicht zu bedeuten, weil R_1 gewöhnlich gegen X_1 stark zurücktritt.

Viel wichtiger ist indessen die nicht zu verkennende Tatsache, daß sowohl die Sternschaltung mit Nulleiter als auch die Dreieckschaltung als Primärschaltungen weit schwächere Zusatzströme I_z und deshalb auch weit schwächere Zusatzkraftflüsse zu erwarten haben als die primäre Sternschaltung ohne Nulleiter. Sie haben deshalb beide einphasige Kurzschlüsse, die neben dem symmetrischen dreiphasigen viel mehr Beachtung verdienen als der einphasige Kurzschluß der Sternschaltung ohne Nulleiter.

Warum bevorzugt der Transformator im einphasigen Kurzschluß die Sternschaltung ohne Nulleiter so auffällig? Warum wehrt er sich, besser gesagt, gegen ihre einphasigen Kurzschlüsse mit besonderem Eifer? Warum setzt er gerade ihren Kurzschlüssen ungewöhnlich starke einphasige Zusatzkraftflüsse gegenüber?

Die Tatsache, daß der Eisenkern des dreiphasigen Transformators eigentlich nur für symmetrische Belastungen gebaut ist, erklärt das Auftreten des einphasigen Zusatzkraftflusses. Die weitere Tatsache, daß die Sternschaltung ohne Nulleiter eigentlich ebenfalls unsymmetrische Belastungen ausschließt, unterstreicht die Notwendigkeit ungewöhnlich starker Abwehrmaßnahmen bei einphasigen Kurzschlüssen.

Bei der primären Dreieckschaltung, ebenso aber auch bei der primären Sternschaltung mit Nulleiter, verletzt der einphasige Kurzschluß nur die magnetischen Symmetrieerwartungen. Bei der Sternschaltung ohne Nulleiter hat er sowohl die verletzte magnetische als auch die verletzte elektrische Symmetrie gegen sich.

Kann man sich nach alledem mit der Feststellung begnügen, daß der magnetisch ohnehin, elektrisch jedoch erst durch die primäre Sternschaltung ohne Nulleiter restlos auf Symmetrie eingestellte Transformator bei der ärgsten unsymmetrischen Belastung, beim einphasigen Kurzschluß, gewissermaßen elektromagnetisch zusammenbricht und deshalb nur einen verhältnismäßig schwachen Kurzschlußstrom durchläßt, daß er jedoch mit Primärschaltungen, die Unsymmetrien zulassen, lediglich einen kleinen zusätzlichen Blindwiderstand entwickelt, der ein wenig den Kurzschlußstrom drückt?

Man überlege: Ohne Zusatzkraftfluß und seinen zusätzlichen Blindwiderstand wäre, wie im 24. Abschnitt nachgewiesen, der einphasige Kurzschlußstrom stärker als der dreiphasige, weil er nur mit zwei Dritteln der primären Wicklungswiderstände zu kämpfen hätte. Sinkt er mit Hilfe des doch auftretenden Zusatzkraftflusses wirklich unter die Stärke des dreiphasigen Kurzschlußstroms?

Bei der Betrachtung des Falles der primären Sternschaltung mit Nulleiter sahen wir einen Zusatzkraftfluß von solcher Stärke auftreten, daß das Netzspannungsdreieck gerade um ein Drittel der primären Widerstandsspannung ΔE_1 der verunglückten Phase parallel zu sich selbst verschoben wird. In dem verschobenen, nun vom

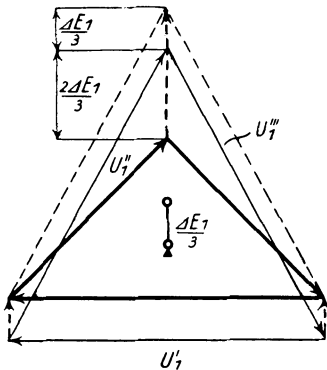


Abb. 36

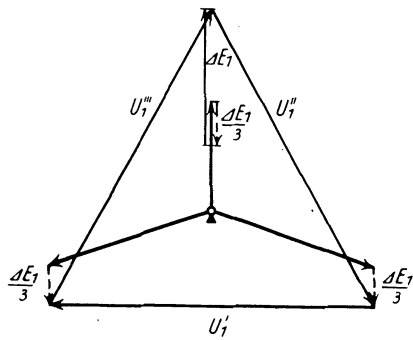


Abb. 37

Hauptkraftfluß erfaßten Spannungsdreieck verschiebt allerdings die eine Phasenwiderstandsspannung ΔE_1 einen Eckpunkt. In bereits bekannter Weise verrückt der Hauptkraftfluß sofort den neuen Nullpunkt um $\frac{1}{3} \cdot \Delta E_1$, d. h. in die alte Lage, dorthin, wo er ohnehin festgenagelt ist (Abb. 36).

Das Spiel geht jedoch weiter. Hauptkraftfluß und Zusatzkraftfluß induzieren primär und sekundär auf die gleiche Weise die Wicklungsspannungen. In der verunglückten Phase geben beide zusammen, wie Abb. 37, die allerdings keine Wirkwiderstände berücksichtigt, zeigt, eine Sekundärspannung, die genau so groß ist, wie im dreiphasigen Kurzschluß. Diese Sekundärspannung treibt über die allein noch übrigbleibenden normalen Wicklungswiderstände — der zusätzliche des Zusatzkraftflusses ist bereits berücksichtigt — einen einphasigen Kurzschlußstrom gleicher Stärke, wie ihn der dreiphasige Kurzschluß hervorbringt.

29. Zweiphasiger Kurzschluß. Das Kurzschlußgebiet des Transformators.

Der einphasige Kurzschlußstrom kann unter Umständen genau so gefährlich werden wie der dreiphasige. Das ist das Schlußergebnis der Theorie des einphasigen ungeschwächten Klemmenkurzschlusses. Er kann nicht gefährlicher werden, das steht jetzt ebenfalls fest. Der dreiphasige symmetrische ungeschwächte Kurzschluß bleibt der Grenzfall. Seine Lösungen des Kurzschlußstromkraft- und des Kurzschlußstromwärmeproblems genügen auch dem einphasigen Kurzschluß.

Die Primärschaltung des kurzgeschlossenen Transformators entpuppt sich merkwürdigerweise als eine wichtige Größe des Kurzschlußproblems, die im dreiphasigen Kurzschluß ganz im Hintergrunde

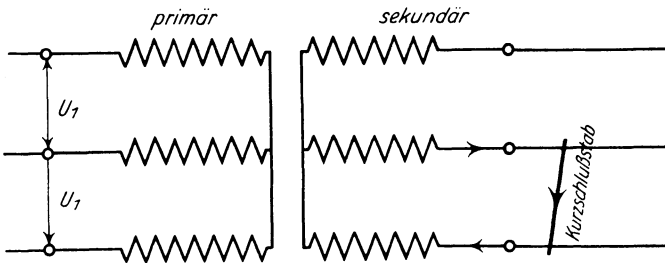


Abb. 38

bleibt, im einphasigen jedoch stark hervortritt. Sie ist es, die den Zusammenhang mit dem dreiphasigen Kurzschluß nicht verlorengehen läßt, wenn beim Übergang vom dreiphasigen Kurzschluß zum einphasigen der Abstieg von den gewaltigen Höhen der Kurzschlußgefahren beginnt.

Die primäre Sternschaltung mit Nulleiter ist im europäischen Transformatorbau eine seltene Schaltung. Verhältnismäßig häufig ist die Dreieckschaltung, die praktisch den einphasigen Kurzschluß mit dem dreiphasigen gleichstellt. Mit der häufigsten Primärschaltung, mit der Sternschaltung ohne Nulleiter, setzt erst praktisch das Nachlassen der Kurzschlußsicherheitsprobleme ein. Sie bringt gewaltige Erleichterungen.

Wie steht es nun mit dem ungeschwächten zweiphasigen Klemmenkurzschluß? Steht er zwischen dem dreiphasigen und dem ein-

phasigen? Hat er auch seinen unmittelbaren Anschluß an den dreiphasigen Fall? Läßt er dem dreiphasigen Kurzschluß die Rolle des Grenzfalles ungeschmälert?

Nebenstehende Abb. 38 gibt das Schaltbild des zweiphasigen Kurzschlusses. Sie setzt sekundär die Sternschaltung mit oder ohne Nulleiter voraus. Sie zeigt, daß die beiden vom Kurzschluß betroffenen Phasen gleich große, jedoch entgegengesetzt gerichtete Sekundärkurzschlußströme führen. Diese beiden Ströme sind selbstverständlich ein und derselbe zweiphasige Kurzschlußstrom.

Es liegt nahe, den Fall des zweiphasigen auf den Fall des einphasigen Kurzschlusses zurückzuführen. Tut man es, so hat man einen einphasigen Kurzschluß mit dem Sekundärstrom I_{k_2} und einen zweiten einphasigen Kurzschluß mit dem Sekundärstrom $-I_{k_2}$ vor sich. Zwei gleiche, bereits bekannten Kurzschlußbilder entgegengesetzten Vorzeichens müssen sich so ergeben. Aufeinandergelegt, bauen sie das Gesamtbild des zweiphasigen Kurzschlusses auf.

Daß dabei die dem einphasigen Kurzschluß eigentümlichen primären Zusatzströme I_z verschwinden, liegt auf der Hand. Mit ihnen verschwindet auch der Zusatzkraftfluß. Der dreiphasige Transformator wehrt sich in keiner Weise gegen zweiphasige Belastungen. Das ist übrigens unmittelbar einleuchtend: Jede symmetrische dreiphasige Belastung wird in dem Augenblick zweiphasig, in dem der dritte Belastungsphasenstrom gerade durch Null geht. Die zweiphasige Belastung ist gewissermaßen nur ein herausgebrochener und sein eigenes Leben weiterlebender Sonderfall der dreiphasigen. Diese Eigenschaft fehlt der einphasigen Belastung.

Nun ist es nicht schwer, einzusehen, daß im zweiphasigen Kurzschluß die primären Kurzschlußströme ebenso einen einzigen Strom bilden müssen wie die beiden sekundären Kurzschlußströme und daß die dritte, vom Kurzschluß verschonte Phase auch primär stromlos bleibt.

Damit ist aber auch schon der Weg zur Bestimmung des zweiphasigen Kurzschlußstromes freigelegt. Er hat nacheinander die Wicklungswiderstände der beiden verunglückten Phasen zu überwinden und hat demnach mit verdoppelten Phasenwiderstandsspannungen zu kämpfen. Andererseits treibt ihn die verkettete Spannung, die nur $\sqrt{3}$ -mal größer ist als die Phasenspannung. Sofort folgt daraus, daß der zweiphasige Kurzschlußstrom des Transformators nur rund 86 Hundertstel des dreiphasigen erreicht.

Die Kurzschlußgefahren sind beim zweiphasigen Kurzschluß unverkennbar in vollem Abstieg. Der $\frac{\sqrt{3}}{2}$ -mal kleinere Kurzschlußstrom

droht nur noch mit drei Vierteln jener Stromkraft- und jener Stromwärmegefahr, die den dreiphasigen Kurzschluß beschäftigen. Diese Tatsache nimmt dem zweiphasigen Kurzschluß des Transformators fast jede praktische Bedeutung.

Es gibt allerdings Kurzschlußmöglichkeiten, die auch den zweiphasigen Kurzschluß beachtenswert machen können. Ein primär und sekundär in Dreieck geschalteter Transformator (Abb. 39) erlebt den zweiphasigen Klemmenkurzschluß in einer verwickelten Gestalt.

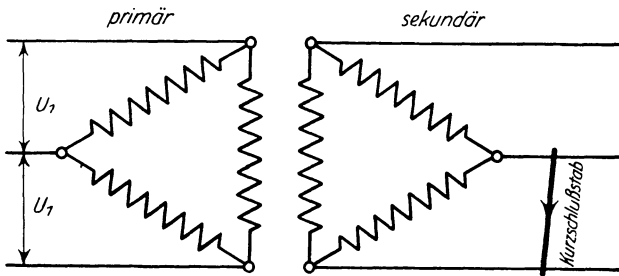


Abb. 39

Die eine seiner drei Phasen ist für sich allein kurzgeschlossen, die beiden anderen in Hintereinanderschaltung. Das gibt einen Gesamtkurzschluß, der sich aus einem einphasigen und einem zweiphasigen zusammensetzt.

Das weite Gebiet der ungeschwächten Klemmenkurzschlüsse des dreiphasigen Transformators, die sich durch die Anzahl der jeweils betroffenen Phasen, durch die Phasenschaltungsarten, schließlich auch durch die elektrischen Zustände im Kurzschlußeintritts Augenblick voneinander unterscheiden, erscheint nun endlich geordnet. Die Gefahren sind in diesem, schließlich doch gut übersehbaren Gebiet nicht überall gleich hoch. Die höchsten Gipfel der Stromkraft- und der Stromwärmegefahr türmen sich doch dort auf, wo symmetrische dreiphasige Kurzschlüsse zu finden sind.

Auch im Gesamtbild der Kurzschlußerscheinungen äußert sich das eigentliche Wesen des dreiphasigen Transformators. Für symmetrische Belastungen gebaut, macht er Schwierigkeiten, wenn man

ihm eine unsymmetrische Belastung zumutet. Für ihn ist der Kurzschluß eine Belastung wie jede andere. Seine Bereitwilligkeit, symmetrische Kurzschlüsse sich besonders frei entwickeln zu lassen, ist für die Praxis, für die der Kurzschluß eine unerwünschte Erscheinung ist, unangenehm. Aber man kann nicht dieselbe Eigenschaft des Transformators einmal willkommen heißen, daß andere Mal ver wünschen. Sie ist da, oder sie ist nicht da. Ihre Schattenseiten muß man in den Kauf nehmen, wenn man ihre Lichtseiten genießen will.

So kommt es, daß für den lebendigen Transformator das Kurzschlußsicherheitsproblem offensichtlich zum Problem des dreiphasigen ungeschwächten Klemmenkurzschlusses zusammenschumpft. Trotzdem wäre es verfehlt, alle anderen Kurzschlußarten einfach mit der Feststellung abtun zu wollen, daß sie schwächer, ungefährlicher sind und deshalb überhaupt keine Beachtung verdienen.

Kurzschlüsse sind Unglücksfälle. Sie kommen unangemeldet, einmal in dieser, das andere Mal in jener Gestalt. Der Transformator hat nicht alles überstanden, wenn er einmal durch einen schweren Kurzschluß gegangen ist. Das nächste Mal mag ihn ein leichterer Kurzschlußschlag treffen, es kann auch Kurzschlüsse regnen, wenn es das Unglück will.

Mehrere leichtere Kurzschlüsse können schließlich einen schweren aufwiegen. Ist es wirklich ausgemacht, daß neben einem schweren dreiphasigen Kurzschluß zehn zweiphasige keine Rolle spielen? Sicherlich nicht. Die größere Wahrscheinlichkeit einer Kurzschlußart vergrößert offenbar ihr Gewicht.

Hat man dies erkannt, hat man einmal eingesehen, daß die Theorie der Kurzschlußsicherheit des Transformators nicht auf dem Standpunkt bleiben darf, der ärgste Kurzschlußfall sei als vereinzelte Erscheinung unschädlich zu machen, so wird man nicht mehr lediglich die höchsten Gipfel der Kurzschlußgefahren im Auge behalten.

Das ganze weite Gebiet der Kurzschlüsse ist mit dem Leben des Transformators verknüpft. Der Zufall macht während der Lebensdauer des Transformators Kurzschlußangriffe, deren Anzahl und Schärfe im voraus unbestimmbar sind. Die Wahrscheinlichkeitsrechnung, die ständige Begleiterin des beobachteten Zufalls, verlangt ihre Mitwirkung im Kurzschlußsicherheitsproblem.

Um wirklich Zutritt zu bekommen, müßte sie sich auf reiches statistisches Material stützen können. Dieses Material könnte sie jedoch allerdings nur dann gehörig durcharbeiten, wenn das ganze Kurzschlußgebiet durchforscht wäre.

Das Sammeln des statistischen Materials ist nicht Sache der Kurzschlußtheorie. Wohl aber muß die Theorie das ganze Kurzschlußgebiet durchforschen und beschreiben. Es genügt nicht, daß sie den drei-, zwei- und einphasigen ungeschwächten Klemmenkurzschluß erledigt. Es gibt noch eine Unmenge anderer Kurzschlüsse, die sich sofort melden, wenn man die in den bisherigen Untersuchungen gezogenen Wirkungsgebietgrenzen des Kurzschlusses fallen läßt.

Kurzschlüsse, die über die Sekundärklemmen des Transformators hinausgreifen, die sich über die Primärklemmen zurück bemerkbar machen, kamen in den bisher entworfenen Bildern nicht vor. Ihnen gilt deshalb die Fortsetzung der bisherigen Erforschungen.

III. Der über die Transformator клемmen hinausgreifende Kurzschluß. Allgemeines

30. Der Kurzschluß im Sekundärnetz.

Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Kurzschlußarten

Entsteht der Kurzschluß, der den dreiphasigen Transformator heimsucht, nicht unmittelbar an den Sekundärklemmen, sondern irgendwo draußen im Sekundärnetz, so ergeben sich für die Theorie eigentlich keine neuen Probleme. Der Leitungskurzschluß ist für den das Leitungsnetz speisenden Transformator immer nur eine Abart des Klemmenkurzschlusses.

Das kurzgeschlossene Leitungsstück ist für die untersuchende Theorie einfach ein Stück der Sekundärwicklung des vom Kurzschluß

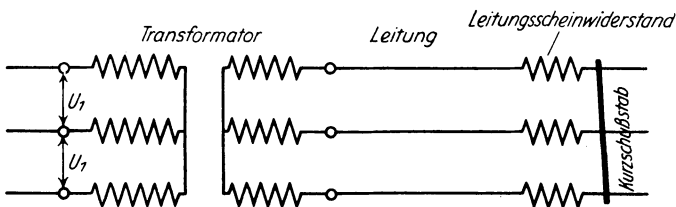


Abb. 40

betroffenen Transformators. Der Wirk- und der Blindwiderstand dieses Stückes, mit dem Wirk- und Blindwiderstand der Sekundärwicklung des Transformators in Hintereinanderschaltung (Abb. 40) verbunden, vergrößern scheinbar die Kurzschlußspannung e_k des Transformators und drücken so die Stärke des dauernden Kurzschlußstroms.

Das Bild ist so einfach, daß es sofort ein weites neues Kurzschlußgebiet übersehen läßt. Es ordnet offenkundig die Leitungskurzschlüsse in drei bereits bekannte Gruppen ein: in dreiphasige symmetrische, zweiphasige und einphasige.

Die vorangehenden Untersuchungen beschreiben gleichsam Grenzfälle der Leitungskurzschlüsse aller drei Gruppen, sie gelten aber auch sofort den Leitungskurzschlüssen selbst. Was sich bei der

Ausdehnung ihres Geltungsbereiches ändert, sind immer wieder lediglich die Wicklungswiderstände, genauer gesagt, die Sekundärwicklungswiderstände.

Es ist klar: Leitungskurzschlüsse sind immer schwächer als Klemmenkurzschlüsse, es sei denn, daß die Sekundärleitung kapazitive Widerstände beisteuert. Es ist ferner klar, daß der Leitungskurzschluß um so schwächer wird, je weiter der Kurzschlußort von den Sekundärklemmen des Transformators wegrückt.

Mit einem vereinzelt Leitungskurzschluß beschäftigt, hat die Theorie, die bereits die drei-, zwei- und einphasigen Klemmenkurzschlüsse des Transformators geklärt hat, eine sehr leichte Arbeit vor sich. Ihre Schwierigkeiten beginnen erst, wenn die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Kurzschlußarten in das Kurzschlußgefahrenbild einzuziehen beginnt.

Welcher Kurzschlußort hat die größte Wahrscheinlichkeit hinter sich? Welche Art des Kurzschlusses, die drei-, die zwei- oder die einphasige, ist die wahrscheinlichste? Wie viele Kurzschlüsse hat der Transformator in seinem Leben zu erwarten?

Die Statistik der Betriebsunfälle großer Netze gibt keine befriedigenden Antworten auf die gestellten wichtigen Fragen. Das spärlich vorhandene statistische Material ist noch so gut wie un verwendbar. Schiebt man es beiseite, so kann man gleichwohl annehmen, daß dreiphasige Kurzschlüsse erheblich seltener sind als zweiphasige und einphasige.

Einphasige Kurzschlüsse gelten zuweilen als die wahrscheinlichste Kurzschlußart. Im Hinblick darauf, daß die Sternschaltung ohne Nulleiter die häufigste Primärschaltung der Transformatoren ist, muß man also die Kurzschlußgefahren dreiphasiger symmetrischer Kurzschlüsse trotz deren geringer Wahrscheinlichkeit doch ernst nehmen. Sie bringen sich eben auf dem Umwege über einphasige Kurzschlüsse zur Geltung.

Man darf indessen doch nicht vergessen, daß einphasige Kurzschlüsse das Vorhandensein des Nulleiters, zum mindesten das Bestehen einer Nullpunkt-klemme voraussetzen. Wir haben in Europa nur in Niederspannungsnetzen Nulleiter. Wir statten allerdings auch Großtransformatoren gerne mit Nullpunkt-klemmen aus, jedoch nur, um die Erdschlußspule anschalten zu können.

Große Transformatoren greifen selten unmittelbar in Niederspannungsnetze ein, sie haben deshalb selten mit einphasigen Leitungs-

kurzschlüssen zu tun. Sie können einphasige Klemmenkurzschlüsse erleben. Klemmenkurzschlüsse sind jedoch als Grenzfälle von Leitungskurzschlüssen sehr seltene Erscheinungen.

Es geht nicht an, einphasige Leitungserdschlüsse als einphasige Leitungskurzschlüsse zu behandeln. Der Vorteil der in Europa üblichen dreiphasigen Hochspannungsenergieübertragung ohne Nullleiter liegt gerade darin, daß der Erdschluß einer Leitungsphase keinen Kurzschluß heraufbeschwört. Die den Nullpunkt der Transformatorwicklung mit der Erde verbindende Erdschlußspule hat bekanntlich die Aufgabe, dem Erdschlußstrom jede Schärfe zu nehmen. Sie erwartet keinen Kurzschlußstrom.

In Niederspannungsnetzen sind einphasige Leitungskurzschlüsse mögliche und verhältnismäßig häufige Erscheinungen. Der einphasige Leitungskurzschluß bedroht vor allem kleine und mittelgroße Transformatoren. Es gibt viel mehr kleine und mittelgroße Transformatoren als Großtransformatoren. Deshalb und nur deshalb kann der einphasige Leitungskurzschluß den Transformatorenbau stark beschäftigen.

Man sollte glauben, daß zweiphasige Leitungskurzschlüsse doch nicht weniger Beachtung verdienen sollten als einphasige. Für Großtransformatoren sind sie entschieden wichtiger. Sie sind ja praktisch die einzige Leitungskurzschlußart die neben dem seltenen dreiphasigen Kurzschluß das Leben des großen Transformators bedroht.

Wenn es feststeht, daß die Kurzschlußgefahren — ganz kleine Leistungen ausgenommen — im dreiphasigen symmetrischen, ungeschwächten Klemmenkurzschluß allen Transformatoren, großen und kleinen, mit denselben Folgen drohen, so darf man folgern, daß der Großtransformatorenbau praktisch am wenigsten zu fürchten hat.

In der Tat hat man häufig mit kleineren Transformatoren zu tun, die von Kurzschlußstromkräften oder auch von der Kurzschlußstromwärme beschädigt wurden, während man sehr selten Kurzschlußschäden an Großtransformatoren sieht. Es ist wohl wahr, daß Beschädigungen durch die Kurzschlußstromwärme unmittelbar eigentlich gar nicht beobachtet werden können, sie drücken sich ja nur in der verkürzten Lebensdauer aus. Deshalb sind die Stromkraftschäden diejenigen Kurzschlußschäden, die für die größere Geborgenheit der Großtransformatoren sprechen können; sie sind es in der Tat, die man bei kleineren Transformatoren häufig sieht, bei großen jedoch sehr selten.

Das Kurzschlußsicherheitsproblem wurde vom Großtransformatorbau aufgerollt. Es erweckte lange den Eindruck, daß es praktisch nur großen Leistungen wichtig sein kann. Gelöst, überrascht es zunächst mit der Feststellung, daß alle Nennleistungen ungefähr gleichberechtigt vor den gleichen Kurzschlußgefahren stehen. Diese Feststellung bildet, wie wir gesehen haben, das Gerippe der Theorie dreiphasiger ungeschwächter Transformatorenkurzschlüsse.

Auf den lebendigen Betrieb mit seinem weiten Kurzschlußgebiet angewendet, lenkt das gelöste Kurzschlußsicherheitsproblem die Aufmerksamkeit auf den kleinen Transformator. Das ist gewiß eine merkwürdige Entwicklung eines Problems, das Jahrzehnte hindurch ungewöhnlich ernst genommen wurde, das erst ein Angstproblem war und allmählich zu einem Modeproblem abgeschliffen wurde.

31. Die Schwächung des Kurzschlusses von der Primärseite her

Das Gebiet der über die Primärklemmen des Transformators hinausgreifenden Kurzschlüsse hat mit dem außerhalb der Sekundärklemmen liegenden Kurzschlußgebiet das eine gemeinsam, daß es geschwächte Kurzschlußfälle umfaßt. Der Kurzschlußstrom des Transformators ist fast ein Blindstrom. Er verursacht im Primärnetz sicherlich Spannungsabfälle. Er schwächt bestimmt die Erregung der Stromerzeuger. Das Hinausgreifen des Kurzschlusses über die Primärklemmen des Transformators hinaus kann also nur eine Schwächung der primär aufgedrückten Spannung und mittelbar eine Schwächung des Kurzschlußstroms bedeuten.

Es gibt ebenso ein weites Gebiet der Kurzschlußschwächungen von der Primärseite des Transformators her, wie es ein weites Gebiet der aus dem Sekundärnetz kommenden Schwächungen gibt. Die sekundäre mitkurzgeschlossene Leitung dämpft stark oder schwach, wenn sie lang oder kurz ist. Auf dem Kurzschlußgebiet vor den Primärklemmen des Transformators messen sich die Nennleistungen.

Wenn weit draußen in einem Verteilungsnetz ein kleiner Transformator vom Kurzschluß ereilt wird, wächst sein Strombezug wohl auf ein Vielfaches, aber dieses Vielfache ist für die Zwischenspannungsversorgungsader vielleicht eine kleine Überlast, für die Hochspannungsfernleitung ist es so gut wie nichts. Der kleine Transformator ist zu schwach, um die ihm aufgedrückte Spannung ernstlich zu schwächen.

Gewiß senkt sich die Spannung an den Primärklemmen des kurzgeschlossenen Transformators in allen Fällen. Das Senkungsmaß ist indessen in verschiedenen Fällen sehr verschieden. Man darf für kleine, in mächtigen Netzen arbeitende Transformatoren keine ausgiebigen Milderungen der Kurzschlußgefahren durch Schwächung der Primärnetzspannung erwarten.

Es hat andererseits keinen Sinn, die Rückwirkungen des Kurzschlusses eines großen Transformators auf die Primärnetzspannung, ja darüber hinaus, auf die Stromerzeugerspannung zu vernachlässigen. Der Kurzschlußstrom eines in der Nähe der Stromerzeugungsstätte aufgestellten Großtransformators übersteigt sehr oft den Gesamtnennleitungsstrom aller Stromerzeuger der Anlage.

Ohne Rechnung, ohne einzelne mögliche Fälle zu untersuchen, sieht man sofort: der Klemmenkurzschluß mit ungeschwächter Primärnetzspannung ist nach zwei Richtungen ein Grenzfall. Von der Primärseite besehen, übertreibt er die Gefahrenbilder um so stärker, je größer der Transformator ist, dem die Bilder gelten.

Abermals werden wir darauf aufmerksam gemacht, daß die Kurzschlußgefahren theoretisch zwar für große und kleine Transformatoren ungefähr gleich groß sind, daß jedoch praktisch der kleine Transformator mehr zu befürchten hat. Abermals rückt das reife Kurzschlußsicherheitsproblem vom Großtransformatorbau, wo es entstanden ist, ab, um dem kleinen und mittelgroßen Transformator zu dienen.

Die aus dem Primärnetz kommende Schwächung der von der lediglich den Transformator sehenden Kurzschlußtheorie erwarteten Kurzschlußströme verschiebt den Kurzschlußgefahrenschwerpunkt viel kräftiger aus dem Groß- in den Kleintransformatorbau als die Ausstattung der Niederspannungsnetze mit Nulleitern, die vorzugsweise kleinen Transformatoren einphasige Kurzschlüsse aufhalsen. Es ist nicht überflüssig, mit einigen groben Strichen ein ungefähres Bild der primären Kurzschlußschwächung zu zeichnen.

Jeder kurzgeschlossene Transformator legt auf sein Primärnetz eine gewisse Kurzschlußdurchflutung $I_{k_1} \cdot w_1$ als eine außergewöhnliche Bürde. Er legt sie mittelbar auch auf den, bzw. auf die Stromerzeuger, die das Primärnetz speisen. Im, bzw. in den Stromerzeugern schwächt nun die Kurzschlußdurchflutung des Transformators die Erregungsdurchflutung der Polräder.

Es ist wahr, daß die Kurzschlußdurchflutung $I_{k_1} \cdot w_1$ für den Stromerzeuger nicht mehr denselben Wert hat wie für den Trans-

formator. Für ungefähr dieselbe Spannung braucht der Stromerzeuger eine andere Windungszahl als der Transformator. Es hat deshalb scheinbar keinen Wert, mit Durchflutungen statt mit Strömen zu rechnen.

Trotzdem hat die auf die Phasenwindungszahl des Stromerzeugers umgerechnete Kurzschlußdurchflutung des verunglückten Transformators eine große Bedeutung für unsere Kurzschlußtheorie. Sie kann offenbar nie größer werden als die Erregungsdurchflutung jenes Stromerzeugers, bzw. jener Stromerzeuger, die den kurzgeschlossenen Transformator speisen.

So betrachtet, bekommt das Kurzschlußproblem des großen Transformators ein ganz neues Gesicht. Nun ist nicht mehr die Kurzschlußspannung des Transformators seine Hauptgröße, sondern das Verhältnis der richtig einander gegenübergestellten Durchflutungen der in Betracht kommenden Stromerzeugerpolräder und des Transformators.

Aus solchen Gegenüberstellungen ermittelt man leicht, daß der Kurzschluß eines großen Transformators immer eine ernst zu nehmende gemeinsame Angelegenheit der Stromerzeuger und des Transformators ist, daß es dabei immer zu schweren Durchflutungskämpfen kommt und daß Spannungssenkungen auch dann wirksam eingreifen, wenn Schnellregler in aller Eile die letzten Erregungsrücklagen heranziehen.

Daß die Kurzschlußauseinandersetzungen des Transformators mit den ihn speisenden Stromerzeugern mehr und mehr an Bedeutung verlieren, je mehr die Nennleistung des Transformators hinter der Stromerzeugernennleistung zurückbleibt, ist klar. Deshalb ist es das Schicksal des kleinen Transformators, im Kurzschluß fast die ungeschwächte Primärspannung ertragen zu müssen, während der große Transformator immer einen erheblichen Teil der Kurzschlußlast auf die Stromerzeuger abwälzt.

Es gibt nur einen Trost für den kleinen Transformator. Wir haben in den Untersuchungen der primär ungeschwächten Klemmenkurzschlüsse immer damit gerechnet, daß der Wirkwiderstand der Transformatorwicklung neben dem Blindwiderstand keine Bedeutung hat. Daraus ergab sich eine Zunahme der Kurzschlußspannung des Transformators proportional mit der vierten Wurzel aus der Nennleistung. Nur deshalb erschienen die Kurzschlußgefahren für alle Nennleistungen gleich hoch.

In Wirklichkeit nimmt der bezogene Ohmsche Spannungsabfall des Transformators, wie wir gesehen haben, mit der vierten Wurzel

aus der fallenden Leistung zu. Je kleiner die Leistung, um so ausgiebiger stärkt er die Kurzschlußspannung. Er ist es, der die Ungerechtigkeiten des Kurzschlußsicherheitsproblems etwas mildert.

Einen weiteren Ausgleich würde die Ermäßigung der Kurzschlußspannungen großer Transformatoren bringen. Sie sind, wie wir wissen, nicht allein auf natürlichem Wege, d. h. mit dem Wachsen der Nennleistung, groß geworden. Die Angst vor den Kurzschlußstromkräften hat Übertreibungen ausgelöst, die wieder beseitigt werden könnten.

Es ist schwer zu verkennen, daß Großtransformatoren bei weitem nicht so großen Kurzschlußgefahren ausgesetzt sind wie man gerne geglaubt hat und daß Kleintransformatoren sorgfältiger gegen Kurzschlüsse geschützt werden sollten als man es gerne getan hat. Der Transformatorenbau hat noch nicht die richtige Einstellung zu dem Problem, das ihm verhältnismäßig spät und außerdem in einer etwas heftigen Form gestellt wurde, gefunden.

32. Ungeklärte Fragen der Kurzschlußtheorie des Transformators

Die Theorie der Transformatorenkurzschlüsse hat nur scheinbar ihre Aufgabe erfüllt, wenn sie die verschiedenen Kurzschlußarten geklärt und beschrieben, wenn sie das weite Kurzschlußgebiet ausgemessen und durchforscht hat. Sie muß sich auch noch mit den Feinheiten der Kurzschlußstromkraft- und der Kurzschlußstromwärmeerscheinungen zu beschäftigen anfangen.

Die Kurzschlußstromkräfte bearbeiten das Wicklungskupfer mechanisch, sie rufen erhebliche Zug- und Druckspannungen hervor und bedrohen die Festigkeit des Wicklungskörpers. Kann man sich auf die Dauer mit der Feststellung begnügen, daß man höchstens 600 bis 700 kg/cm² im Kupfer zu erwarten hat?

Die technische Mechanik weiß verhältnismäßig wenig von den Festigkeitseigenschaften des Kupfers zu erzählen. Sie weiß aber überhaupt noch vieles nicht, was mit den Angriffen der Kurzschlußstromkräfte zusammenhängt und in das Gebiet der Festigkeitslehre hineinspielt.

Die Kurzschlußstromkraft setzt am Anfang der Stromperiode an, erhebt sich am Ende des ersten Periodenviertels zur vollen Höhe, flaut ab, ist am Ende der halben Periode verschwunden, um sofort

wieder dasselbe Spiel von neuem zu beginnen. Es gibt in jeder Periode zwei Stromkraftangriffe, in jeder Sekunde 100 Stromkraftstöße und folglich während einer Kurzschlußdauer von 10 Sekunden 1000 mechanische Anstrengungen des Wicklungskupfers.

Ermüdet das Kupfer nicht schließlich, wenn es so oft hintereinander gespannt wird? Ist der schnelle Wechsel der Belastungen und Entlastungen bedeutungslos? Kann man Erfahrungszahlen, z. B. 600 kg/cm^2 als „zulässiger“ Zugspannung trauen, wenn man weiß, daß sie Dauerbelastungsversuchen entstammen, jedoch in einem ungemein bewegten Belastungsspiel maßgebend werden wollen.

Es gibt Versuchsergebnisse, an Stählen gewonnen, die zeigen, daß eine Million Belastungswechsel die Festigkeit stark, und zwar unvermittelt heruntersetzen. Wo liegt diese Belastungswechselgrenze beim Kupfer? Ist sie von der Geschwindigkeit, mit der die Belastung wechselt, unabhängig?

Der Transformator erlebt vielleicht 100 Kurzschlüsse. Das gäbe selbst mit 10 Sekunden Kurzschlußdauer erst 100000 Belastungswechsel. Die Stromkräfte ruhen jedoch auch im normalen Betrieb nie. Sie sind gewiß bei normaler Vollast bescheiden, aber sie verursachen immerhin dauernd wechselnde mechanische Belastungen des Kupfers.

Vielleicht weiß der Elektromaschinenbau doch mehr über die mechanischen Eigenschaften des Kupfers zu berichten als die zünftige Festigkeitslehre. Wir haben Maschinen und Transformatoren, die 20, auch 25 Jahre leben, die unausgesetzt dem Stromkraftspiel unterworfen sind, die zuweilen gefährliche Kurzschlüsse erleben. Wir haben noch keine verhängnisvollen Folgen der unaufhörlichen kleinen und der immerhin zahlreichen großen Belastungswechsel bemerkt. Daß es keine gibt, können wir doch nicht behaupten. Wir haben mit zu wenig Aufmerksamkeit den Stromkräften zugesehen.

Die Kurzschlußtheorie des Transformators kennt die Stromkräfte und sieht ihr Spiel. Wie sich diese Kräfte mechanisch auswirken, weiß sie nicht. Sie wird also ihr Wissen vertiefen und ergänzen müssen. Wenn die Festigkeitslehre ihr Wissen über die mechanischen Eigenschaften des Kupfers nicht in ihren eigenen Pflegestätten vervollkommen kann, werden sich ihr die Forschungsstätten der Starkstromtechnik öffnen müssen. Man kann auf die Dauer wichtige Probleme nicht unerforscht und vernachlässigt liegen lassen.

Viel Kleinarbeit hat die Kurzschlußtheorie andererseits auch noch in der Stromwärmerichtung vor sich. Ist das Montsingersche

LebensdauerGesetz schon das letzte Wort? Haben wir die ihm zugrunde liegenden Versuchsergebnisse amerikanischer Forscher nicht kühn ins Gebiet hoher Temperaturen verlängert, um die Kurzschlußstromwärmefahren ausmessen zu können?

Es gibt Versuchsergebnisse, ebenfalls in Amerika geerntete, die nach der Aufstellung des Montsingerschen LebensdauerGesetzes gewonnen wurden. Sie sind düsterer, sie sprechen von stärkeren Einflüssen der Temperatur auf die Lebensdauer. Nimmt man sie ernst, so muß man die Montsingerschen Erlebungserwartungen auf ein Viertel heruntersetzen.

Es ist nicht leicht, sich mit dem Gedanken zu befreunden, daß die Kurzschlußstromwärme eines vollen symmetrischen dreiphasigen Klemmenkurzschlusses vier Hundertstel des Transformatorlebens vergeudet statt eines einzigen. Vielleicht könnte man trotzdem noch an der Kurzschlußhöchsttemperatur von 250° festhalten, umso mehr als wir sie ja bei den heutzutage stark gekürzten Kurzschlußabschaltzeiten ohnehin nicht mehr brauchen. Das, was am meisten stört, ist die Unsicherheit. Solange man innerhalb so weiter Grenzen schwanken kann und muß, wenn es gilt, eine ernste Gefahr auszumessen, steht die Theorie noch auf schwachen Unterlagen.

Es ist wahrscheinlich, daß die praktische Beurteilung des Kurzschlußstromwärmeproblems mehr darunter leidet, daß wir noch über keine verlässliche Statistik der Transformatorenkurzschlüsse verfügen können, als die praktische Beurteilung des Kurzschlußstromkraftproblems. Daß sich die Lebensdauer kürzungen der verschiedenen Kurzschlüsse eines Transformatorlebens addieren, ist fast gewiß. Ob sich die Folgen der mechanischen Beanspruchung durch Kurzschlußstromkräfte von einem Kurzschluß zum nächsten erhalten können, ist ungewiß.

Jedenfalls, auch wenn die Kurzschlußstromwärmefahr allein die Kurzschlüsse eines vollen Transformatorlebens zu einer höheren Einheit zusammenschweißt, kann die Kurzschlußtheorie des Transformators keine endgültigen Ergebnisse erreichen, solange ihr die Statistik der Kurzschlußfälle nicht die notwendige verlässliche Grundlage schafft.

Dies ist somit das abschließende Bild: Die elektrotechnische Seite des Kurzschlußsicherheitsproblems des Transformators ist geklärt. Die mechanische liegt in tiefem Dunkel, die thermische ist schwach beleuchtet, die statistische ist noch sehr vernachlässigt.