Bewertung und optimale Auslegung von Transformatoren und Drosselspulen

Autor(en): **Hugel, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **75 (1984)**

Heft 19

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904483

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bewertung und optimale Auslegung von Transformatoren und Drosselspulen

J. Hugel

Für die vergleichende Bewertung magnetischer Bauelemente wie Transformatoren oder Drosselspulen wird ein Verfahren vorgeschlagen, das hinsichtlich der verschiedenen Zielparameter Gewicht, Raumbedarf, Verluste und Kosten ein quantitatives Urteil erlaubt. Ergänzend hierzu wird die Frage diskutiert, in welchem Ausmass praktisch realisierbare Transformatorkonstruktionen gegenüber einer theoretisch denkbaren Optimalausführung abweichen werden.

L'article propose un procédé d'estimation comparative de composants magnétiques, tels que transformateurs ou bobines de réactance, dans le but d'obtenir un jugement quantitatif des divers paramètres: poids, encombrement, pertes et coût. On discute ensuite de l'ampleur de l'écart entre des constructions de transformateurs pratiquement réalisables et une exécution théoriquement optimale.

Herrn Professor *H. Kern* zum 70. Geburtstag gewidmet.

Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. *J. Hugel*, Professur für elektrotechnische Entwicklungen und Konstruktionen der ETHZ, Gloriastrasse 35, 8092 Zürich.

1. Allgemeines

Bereits im klassischen Werk von Vidmar [1] werden umfangreiche Überlegungen über die Konstruktionsziele des Transformatorenbaus angestellt und verschiedene, aus den technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten folgende Optimierungsansätze besprochen. Allerdings musste Gärtner [2], der diese Ansätze weiter verfolgt und entwickelt hatte, bedauernd feststellen, dass in der Praxis nur geringe Neigung vorhanden war, die so gewonnenen Erkenntnisse tatsächlich auch anzuwenden. Die Optima erwiesen sich als verhältnismässig unempfindlich gegenüber Parameteränderungen und waren zudem nur mit einem gewissen Aufwand zu ermitteln, es wurde demnach kein Vorteil gegenüber den eingeführten und bewährten Entwurfsmethoden erkannt.

Die Situation hat sich seither in mehrfacher Weise geändert. Die Fragen der Optimierung technischer Entwürfe und Prozesse wurden ganz allgemein viel umfassender und auch systematischer in Angriff genommen [3], nicht zuletzt deshalb, weil die gewöhnlich in diesem Zusammenhang geforderten umfangreichen numerischen Rechnungen mit dem Digitalrechner leichter durchgeführt werden können.

Bei Konstruktionen mit ehrwürdiger Tradition, zu denen die Transformatoren und Drosseln sicher zählen, werden die Verbesserungsmöglichkeiten laufend schwieriger und die Fortschritte kleiner ausfallen als bei neueren Entwicklungen. Der Abstand zwischen theoretischer Möglichkeit und dem praktisch Erreichten verringert sich zunehmend und kann nur noch durch eine sorgfältigere Arbeit im Detail weiter vermindert werden. Anderseits erschweren praktische Nebenbedingungen, Normen und fertigungstechnische Einschränkungen die erfolgreiche Anwendung theoretischer Optimierungsverfahren sehr. Unter solchen Umständen sollte die Aufgabe zweckmässig etwas bescheidener angesetzt werden und auf die vergleichende numerische Bewertung einer bestimmten Transformatorkonstruktion zielen. Bei einer vergleichenden Bewertung machen sich die störenden Nebeneinflüsse in aller Regel nicht mehr wesentlich bemerkbar. Dagegen lassen sich die Haupteinflüsse entsprechend den Modellgesetzen berücksichtigen und korrigieren. Dies wiederum erlaubt dann den Vergleich sehr unterschiedlicher Ausführungsformen.

2. Die Bewertungsfunktion

Für eine Konstruktion lassen sich ganz allgemein sehr viele unterschiedliche Optimierungsziele angeben, beim Transformator mit gegebener Scheinleistung Q beispielsweise das kleinste Volumen, das kleinste Gewicht, der kleinste Preis oder die kleinsten Verluste. Da sich mit den Bewertungsfaktoren g_{K0} und g_{W0} für Kern und Wicklung alle genannten Ziele zusammenfassen lassen, sind die entsprechend ableitbaren Aufgaben einheitlich lös- und darstellbar. Je nach Ziel bedeuten die Bewertungsfaktoren die Gewichte, Preise oder Verluste pro Volumen, jeweils gültig für das geometrische Kernvolumen V_{K0} und das Wicklungsvolumen V_{W0}. Gesucht ist also das Minimum der Ziel- oder Bewertungsfunktion

$$Y_0 = g_{K0}\, V_{K0} + g_{W0}\, V_{W0} \qquad (1)$$

Die übertragbare Leistung Q eines Einphasentransformators mit voller Ausnutzung des Wickelraumes und je hälftiger Aufteilung für Primär- und Sekundärwicklung bei sinusförmigen Spannungen und Strömen gelte als Bezugsleistung, ungeachtet der besonderen Aufgabe, die das magnetische Bauelement als Drossel oder Transformator zu erfüllen hat. Mit den Füllfakto-

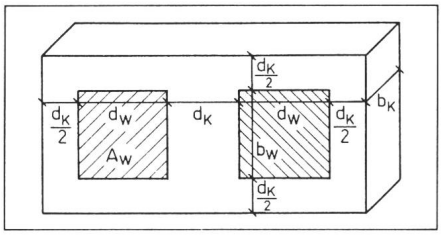

Fig. 1 Kernbauform des Einphasen-Manteltransformators

ren f_K und f_W, den geometrischen Querschnitten A_{K0} und A_{W0} von Kern und Wicklung, der Netzkreisfrequenz ω_N, der Maximalinduktion $\hat{B}$ und der zulässigen Stromdichte S gilt

$$Q = \frac{1}{2\sqrt{2}}\ \omega_N f_K f_W A_{K0} A_{W0} \hat{B} S \qquad (2)$$

Als Normierungsmass l_H für die geometrischen Abmessungen wählt man vorteilhaft

$$l_H^4 = A_{K0} A_{W0} = \frac{2\sqrt{2}\,Q}{\omega_N f_K f_W \hat{B} S} \qquad (3)$$

und bezieht entsprechend die Längen auf l_H, die Querschnitte auf l_H^2 und die Volumina auf l_H^3. Die normierten Grössen werden ohne den Index 0 geschrieben. Mit der zunächst noch willkürlichen Normierungsgrösse g_H für den Bewertungsfaktor wird damit aus der Zielfunktion Gleichung 1:

$$y = \frac{Y_0}{l_H^3 g_H} = \frac{g_{K0}}{g_H} V_K + \frac{g_{W0}}{g_H} V_W \qquad (4)$$

Da die Lage des Optimums von Y_0 beziehungsweise y nur vom Verhältnis g_{W0}/g_{K0} abhängt, wählt man zweckmässig g_H als geometrisches Mittel der Bewertungsfaktoren, damit in Gleichung 4 anstelle der beiden Bewertungsfaktoren nur noch deren Verhältnis erscheint. Es ist also

$$g_H = \sqrt{g_{K0}\, g_{W0}} \qquad (5a)$$

und mit besagtem Verhältnis

$$g = g_{W0}/g_{K0} \qquad (5b)$$

erhält man schliesslich die normierte Zielfunktion:

$$y = V_K/\sqrt{g} + \sqrt{g}\, V_W \qquad (6)$$

mit deren Hilfe sich bei gegebenen Bewertungsfaktoren die Konstruktionen magnetischer Bauelemente vergleichen lassen. Bei einer optimalen Ausführung nimmt y das Minimum an, vorausgesetzt, die übrigen Bezugsparameter können als konstant angesehen werden.

3. Beispiele

Die Figur 1 zeigt den Kern eines Einphasen-Manteltransformators mit den normierten Abmessungen d_K, b_K, d_W und b_W. Da nach (3)

$$\frac{A_{K0}}{l_H^2} \cdot \frac{A_{W0}}{l_H^2}\ A_K A_W = d_K b_K d_W b_W = 1 \qquad (7)$$

ist, sind nur drei unabhängige Variable frei wählbar. Für dieses System mit drei Feinheitsgraden wurde numerisch das Minimum der Zielfunktion gesucht, wobei auf die Einzelheiten dieser Rechnung nicht näher eingegangen werden soll. Die Kurve a der Figur 2 zeigt das Ergebnis der Optimierungsrechnung; der minimal erreichbare Wert y ist als Funktion des Verhältnisses g der Bewertungsfaktoren für Wicklung und Eisen dargestellt.

Muss man nun aus irgendwelchen konstruktiven Gründen zusätzliche, wesentliche Einschränkungen in Kauf nehmen, so wird der Wert y zunehmen. Ist also beispielsweise der Kernquerschnitt quadratisch auszuführen ($d_K = b_K$), weil dies die Spulenkonstruktion wegen allfälliger Kurzschlusskräfte erfordert, so erhält man die Kurve b als Zielfunktion. Wird schliesslich anstelle des Manteltransformators ein Kerntransformator nach Figur 3 gewählt, so erhält man den Verlauf c der Zielfunktion. Der Kerntransformator ist demnach bei $g < 0{,}9$, also einer hohen Bewertung des Kernes gegenüber der Wicklung, günstiger als der Manteltransformator und umgekehrt. Dieses Ergebnis ist auch anschaulich plausibel, wenn man sich den Aufwand für Kern und Wicklung bei beiden Konstruktionen vergleichend verdeutlicht.

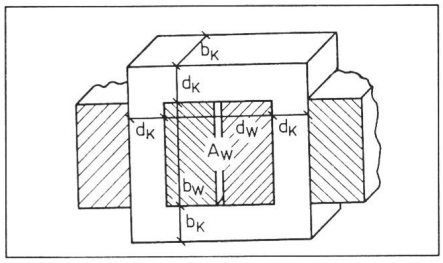

Fig. 3 Einphasen-Kerntransformator

Eine besonders günstige Ausführung stellt der dreischenklig bewickelte Einphasentransformator nach Figur 4 dar [4], dessen Zielfunktion die Kurve d zeigt. Diese Bauform kommt als Fahrzeugtransformator bei Bahnen zur Anwendung, wo eingeschränkte Platz- und Gewichtsverhältnisse vorliegen, ungeachtet der Tatsache, dass die Herstellung dreier Spulen einen zusätzlichen Aufwand bedingt.

In der geschilderten Weise lassen sich magnetische Bauelemente unterschiedlichster Konstruktion und Anwendung auf einfache Weise miteinander vergleichen, wobei gegebenenfalls bei abweichenden Bezugsparametern noch aus den Gleichungen 1 oder 2 die nötigen Korrekturen zu berechnen sind. Vergleicht man hiernach Ein- und Dreiphasentransformatoren gleicher Leistung, so fallen entgegen oftmals vertretener Auffassung die letztgenannten durchwegs aufwendiger aus.

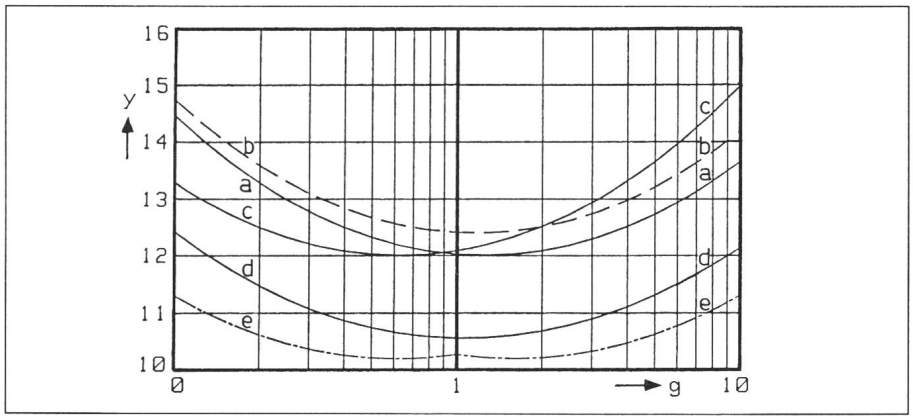

Fig. 2 Die Bewertungsfunktion y für verschiedene Transformatorbauformen

a Einphasen-Manteltransformator
b Einphasen-Manteltransformator mit quadratischem Kernquerschnitt
c Einphasen-Kerntransformator
d Einphasen-Manteltransformator mit drei bewickelten Schenkeln
e Elliptischer Torustransformator
g Relativer Bewertungsfaktor

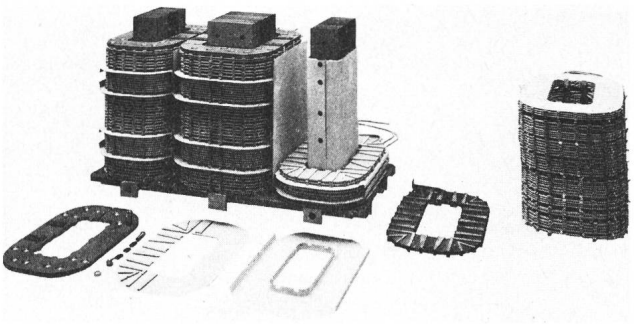

Fig. 4
Einphasen-Manteltransformator mit drei bewickelten Schenkeln [4]

4. Ergänzende Ausführungen

Die dargelegte Bewertungsmethode führt unmittelbar zur Frage, ob es eine Kern-Wicklungs-Anordnung gibt, die, ausgezeichnet vor allen andern, einen minimalen Verlauf der Zielfunktion $y(g)$ aufweist. Auch wenn diese Frage möglicherweise auf ein praktisch nicht realisierungswürdiges Transformatorengebilde führen sollte, so lassen sich dennoch die tatsächlich gebauten Transformatoren dahingehend beurteilen, wie hoch der Mehraufwand gegenüber dem Idealgebilde ausfällt. Man hätte dann ein absolutes Bewertungsmass.

Die Frage nach diesem Optimaltransformator ist nicht einfach beantwortbar. Zunächst kann man sich wegen der möglichen Wirbelströme in Kern und Eisen auf ein Gebilde beschränken, dessen Wicklung aus hinreichend dünnem, elektrisch isoliertem Kupferdraht zur Führung des Stromes und dessen Kern aus hinreichend dünnem, magnetisch isoliertem Eisendraht zur Führung des Flusses aufgebaut ist. Kern und Wicklung umschliessen sich gegenseitig, die Anordnungen von elektrischem und magnetischem Kreis sind zueinander dual; hieraus folgt, dass die gesuchte Idealkonfiguration eine Bewertungsfunktion $y(g)$ aufweisen muss, die zur Ordinate $g = 1$ in der gewählten logarithmischen Darstellung symmetrisch ist. Fehlt diese Symmetrie, so ist gegebenenfalls die an der Ordinatenachse $g = 1$ gespiegelte Funktion mit dem kleineren y-Wert die günstigere Ausführung, und Kern und Wicklung vertauschen ihre Rollen.

Bislang ist eine strenge Lösung des gestellten Problems nicht bekannt. Nach gegenwärtigem Wissen weist der elliptische Torus nach Figur 5 für $g < 1$ den kleinsten Verlauf der Funktion $y(g)$ auf (Fig. 2); entsprechend der oben ausgesprochenen Symmetriebedingung sind für $g < 1$ ein Eisentorus mit Kupferbewicklung, für $g > 1$ aber ein Kupfertorus mit Eisenbewicklung, die nach dem vorgeschlagenen Kriterium derzeit günstigsten bekannten Transformatorenbauformen. Mit Abschätzungen, die hier nicht weiter erörtert werden sollen, lässt sich zudem nachweisen, dass möglicherweise noch günstigere Ausführungen nur noch geringfügig kleinere y-Werte aufweisen können als die beschriebenen elliptischen Toroide. Zudem wird jetzt aus Figur 2 auch ersichtlich, welch vorteilhafte Konstruktion mit dem praktisch realisierbaren, dreifach bewickelten Manteltransformator gelungen ist.

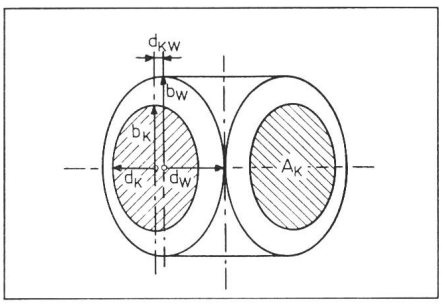

Fig. 5 Elliptischer Torus-Transformator

Literatur

[1] *M. Vidmar:* Die Transformatoren. 1. Auflage. Berlin, Springer-Verlag 1921.

[2a] *R. Gärtner:* Bemessungsregeln für Transformatoren. Teil 1: Der Ringtransformator. Arch. Elektrotechn. 62(1980)4/5, S. 187...194.

[2b] *R. Gärtner:* Bemessungsregeln für Transformatoren. Teil 2: Die gebräuchlichen Transformatorentypen. Arch. Elektrotechn. 62(1980)6, S. 309...315.

[3] *P.E. Gill, W. Murray* and *M.H. Wright:* Practical optimization. London a.o., Academic Press 1981.

[4] *W.U. Bohli, H.M. Deng* und *W. Müller:* Transformatoren und Glättungsdrosselspulen für Wechselstrom-Triebfahrzeuge. Brown-Boveri-Mitteilungen 12(1977), S. 724...734.