Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 17

Artikel: Abschätzung der Ventilationsverluste von vertikal gelagerten Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen

Autor: Teichmann, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914932

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 17.07.2025

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

Abschätzung der Ventilationsverluste von vertikal gelagerten Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen

Von H. Teichmann

621.313.32.017;

Aus Messungen an vertikal gelagerten Synchrongeneratoren werden empirische Formeln zur Abschätzung der Ventilationsverluste abgeleitet. Parameter sind die Drehzahl, die Statoreisenlänge und die Statorbohrung.

Des formules empiriques pour l'évaluation des pertes par ventilation des alternateurs à axe vertical sont définies à partir de résultats de mesure. La vitesse, la longueur de la partie active et le diamètre intérieur du stator servent de paramètres.

1. Einleitung

Beim Betrieb elektrischer Maschinen mit Luftkühlung treten Verluste durch Ventilation auf, welche sich aus den Oberflächenreibungsverlusten P_R und den eigentlichen Ventilationsverlusten P_V zusammensetzen. Die ersteren sind auf eine Kraft gegen die Bewegungsrichtung des Rotors zurückzuführen. Der zweite, wesentlich grössere Anteil entsteht dadurch, dass Luft axial angesaugt, durch den rotierenden Teil der Maschine geleitet und gegen den Stator getrieben wird.

Da die gesamten Ventilationsverluste $P = P_R + P_V$ bei Synchronmaschinen unabhängig vom jeweiligen Betriebszustand auftreten, können sie bei Teillast einen erheblichen Anteil der Gesamtverluste ausmachen. Um das Ziel einer ausgewogenen Konstruktion zu erreichen, ist deshalb die Kenntnis der Verluste $P_R + P_V$ schon im Stadium der elektromagnetischen Auslegung wünschenswert.

Zwar ist das Problem der kühltechnischen Vorausberechnung von elektrischen Maschinen grundsätzlich gelöst [1][1]), doch setzt dieses Verfahren die Kenntnis zahlreicher konstruktiver Einzelheiten voraus, welche erst *im Anschluss* an die eigentliche Auslegung festgelegt werden können. Ziel dieser Studie ist daher die Entwicklung einer Näherungsformel auf Grund von Erfahrungswerten, welche die Abschätzung der Verluste $P_R + P_V$ in Abhängigkeit von wenigen Einflussgrössen ermöglicht. Diese Formel wird empirisch von Versuchsergebnissen abgeleitet.

2. Messungen

Die Reibungsverluste einer Wasserkraftmaschine können im Auslaufversuch ermittelt werden. Sie bestehen aus den Lager- und Bürstenreibungsverlusten, den Oberflächenreibungsverlusten P_R sowie aus den eigentlichen Ventilationsverlusten P_V. Während die Lagerreibungsverluste mit Hilfe der Konstruktionsunterlagen zu berechnen sind [2], dürfen die Bürstenreibungsverluste im Rahmen dieser Untersuchung vernachlässigt werden. Damit ergeben sich die gesamten Ventilationsverluste $P = P_R + P_V$ als Differenz der gemessenen gesamten Reibungsverluste und der berechneten Lagerreibungsverluste.

Zur Auswertung stehen Messungen an 40 Maschinen zur Verfügung. Ihre Drehzahlen liegen im Bereich von 66,6 bis 750 U/min, während die Statoreisenlängen zwischen 0,3 und 2,1 m und die Statorbohrungen zwischen 0,8 und 8,25 m variieren. Da alle Generatoren vom gleichen Hersteller stammen, wird die Auswertung nicht durch technologische Besonderheiten beeinträchtigt, wie sie bei verschiedenen Fabrikaten erwartet werden müssten. Anderseits muss angenommen werden, dass die im Verlauf einer längeren Zeitspanne gebauten Maschinen durch die Entwicklung bedingte Unterschiede aufweisen.

3. Die Auswahl der Kriterien

Die weiteren Untersuchungen gehen davon aus, dass folgende drei Parameter von wesentlichem Einfluss auf die gesamten Ventilationsverluste sind: Drehzahl n, Statoreisenlänge L und Statorbohrung D.

Maschinen gleicher Leistung, aber verschiedener Drehzahl und Materialausnützung, weisen unterschiedliche konstruktive Merkmale auf, welche naturgemäss $P_R + P_V$ beeinflussen. Daher besteht kein direkter Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung und diesen Verlusten, und die Leistung ist als Kriterium nicht geeignet.

4. Qualitative Abhängigkeiten

4.1 Einfluss der Drehzahl

Sowohl die Oberflächenreibungsverluste als auch die eigentlichen Ventilationsverluste einer gegebenen Maschine folgen der dritten Potenz der Drehzahl [2; 3]. Daher können alle Werte $P_R + P_V$ auf eine einheitliche Drehzahl bezogen werden, wozu $n^* = 300$ U/min gewählt wird. Es ist zu bedenken, dass die Konstruktionsunterschiede zwischen langsam- und schnellaufenden Maschinen bei dieser Umrechnung nicht berücksichtigt werden. Diese Einflüsse werden jedoch nicht vernachlässigt, sondern wirken sich auf die Abhängigkeit von der Statorbohrung aus.

4.2 Abhängigkeit von der Statoreisenlänge

Die Oberflächenreibungsverluste P_R entstehen sowohl an den beiden Stirnflächen des Rotors als auch an dessen Mantelfläche. Daher existiert auch für $L = 0$ ein gewisser Verlustanteil. Die eigentlichen Ventilationsverluste werden gemeinsam von den Ventilatoren und dem Polrad verursacht. Für $L = 0$ verbleibt also ebenfalls ein Anteil für die Ventilatoren. Aus diesen beiden Überlegungen folgt, dass die Kurve $P = f(L)$ nicht durch den Ursprung geht.

Die Verluste P_R sind im Bereich der Mantelfläche des Rotors proportional zur Eisenlänge. Die wesentlich höheren Verluste P_V wachsen ebenfalls mit der Eisenlänge, aber schwächer als proportional. Damit ist der grundsätzliche Verlauf der Kurve $P = f(L)$ bekannt.

Die gemessenen Maschinen haben derart verschiedene Durchmesser, dass es nicht möglich ist, für einen gegebenen Wert der Statorbohrung die Funktion $P = f(L)$ zu ermitteln. Eine erste Aussage über diese Abhängigkeit ist aber auf dem Umweg über die Funktionen $P = f(D)$ möglich, welche für einzelne Mittelwerte von L näherungsweise bestimmt werden können, da genügend Messungen an Maschinen mit ähnlicher Länge L vorliegen. Zu diesem Zweck werden Maschinen von ähnlicher Eisenlänge L ohne Umrechnung in Gruppen zu-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

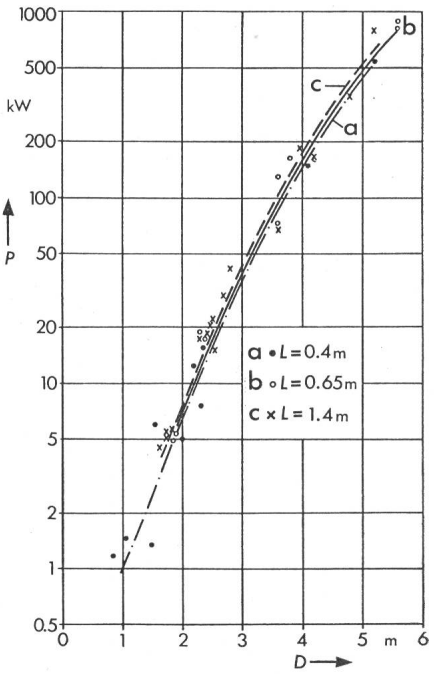

Fig. 1 **Gesamte Ventilationsverluste P in Funktion der Statorbohrung D**
$n^* = 300$ U/min
Die Kurven umfassen a $L = 0{,}3...0{,}5$ m
b $L = 0{,}53...0{,}8$ m
c $L = 1{,}0...1{,}8$ m

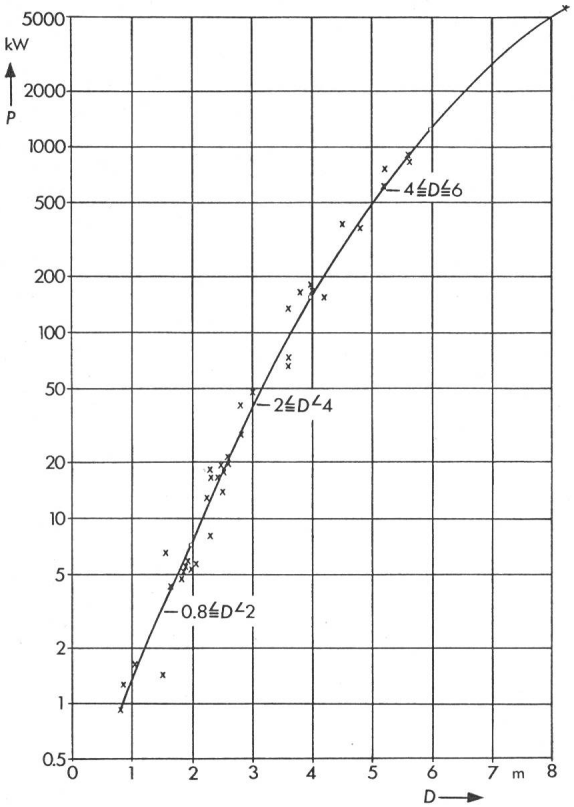

Fig. 3 **Gesamte Ventilationsverluste P in Funktion der Statorbohrung D**
$n^* = 300$ U/min
$L^* = 0{,}8$ m

sammengefasst und die Funktion $P = f(D)$ für jede Gruppe aufgetragen. Fig. 1 zeigt diese Kurven für die mittleren Eisenlängen $L = 0{,}4$ m, $L = 0{,}65$ m und $L = 1{,}4$ m. Die drei Kurven sind einander sehr ähnlich. Sie zeigen, dass die Verluste vom Durchmesser sehr stark, von der Eisenlänge aber fast nicht abhängen.

Entnimmt man nun der Fig. 1 die Werte von P für $D = 2$ m, 3,5 m und 5 m, so lässt sich P in Funktion von L darstellen (Fig. 2). Obwohl es sich bei den Funktionen $P = f(L)$ mit D als Parameter nur um Näherungen handelt, kann festgestellt werden, dass der Anstieg stets in der gleichen Grössenordnung

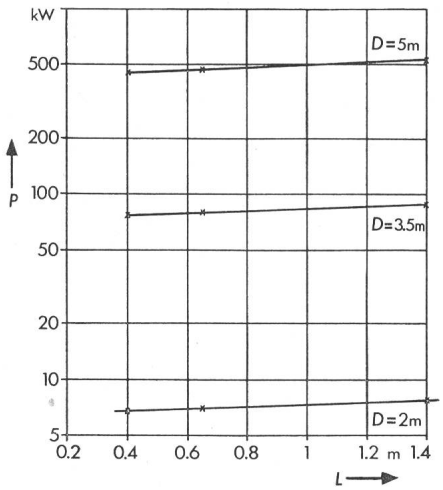

Fig. 2 **Gesamte Ventilationsverluste P in Funktion der Statorlänge L**
$n^* = 300$ U/min

liegt. Die Analyse ergibt Exponenten von etwa 0,1, im Mittel von 0,11. Dieser Wert wird im folgenden benutzt, um die bereits auf $n^* = 300$ U/min bezogenen Werte P auf eine mittlere Eisenlänge $L^* = 0{,}8$ m umzurechnen.

5. Aufbau der Näherungsformel

5.1 Abhängigkeit von der Statorbohrung

Die auf $n^* = 300$ U/min und $L^* = 0{,}8$ m bezogenen Verlustwerte P werden in Funktion von D dargestellt. Die durch diese Punkte zu legende Kurve (Fig. 3) ist vom Typ $y = a \cdot D^m$. Der Faktor a und der Exponent m sind nicht konstant, sondern hängen von D ab, was auf konstruktive Unterschiede zwischen grösseren und kleineren Generatoren zurückzuführen ist. Es ist deshalb zweckmässig, die Kurve z.B. in drei Bereiche zu unterteilen:

$$0{,}8 \leqq D < 2 \quad P = 1{,}5 \cdot D^{2,2} \tag{1a}$$
$$2 \leqq D < 4 \quad P = 0{,}31 \cdot D^{4,5} \tag{1b}$$
$$4 \leqq D \leqq 6 \quad P = 0{,}13 \cdot D^{5,1} \tag{1c}$$

5.2 Abhängigkeit von der Statoreisenlänge

Mit Hilfe der Formeln 1a...1c ist es möglich, die für $n^* = 300$ U/min bekannten Verluste auf einen beliebigen Wert von D umzurechnen. Für $D^* = 2$ m als Bezugsgrösse ergeben sich gemäss Fig. 4 die gesamten Ventilationsverluste in Funktion der Statoreisenlänge L. Im interessierenden Bereich ($L = 0.35$ bis 1,8 m) gilt die Beziehung

$$P = 7{,}5 \cdot L^{0,11} \tag{2}$$

entsprechend Fig. 2 und dem dort ermittelten Exponenten.

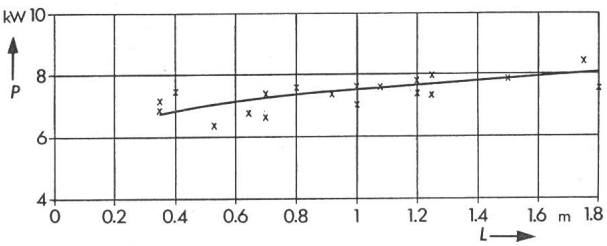

Fig. 4 **Gesamte Ventilationsverluste P in Funktion der Statorlänge L**
$n^* = 300$ U/min
$D^* = 2$ m

Wie unter 4.2 begründet wurde, geht die Kurve $P = f(L)$ in Wirklichkeit nicht durch den Ursprung. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, ist es zweckmässiger, die Kurve in Fig. 4 durch folgende Formel auszudrücken:

$$P = 2{,}5(L^{0,3} + 2) \tag{3}$$

Diese Beziehung ist der Formel (2) im genannten Bereich gleichwertig und trägt den physikalischen Gegebenheiten Rechnung.

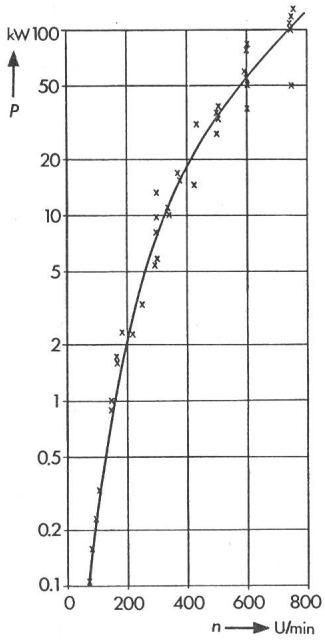

Fig. 5
Gesamte Ventilationsverluste P in Funktion der Drehzahl n
$L^* = 0{,}8$ m
$D^* = 2$ m

6. Die gesamten Ventilationsverluste

Mittels der Beziehungen (1) und (3) können die gesamten Ventilationsverluste P auf $D^* = 2$ m und $L^* = 0{,}8$ m umgerechnet werden. In Fig. 5 ist das Resultat in Funktion der Drehzahl aufgetragen. Die Kurve folgt der Gleichung

$$P = 2{,}7 \cdot 10^{-7} \cdot n^3 \tag{4}$$

Die vollständige Verlustformel hat demnach die Form

$$P = b \cdot n^3 \cdot D^c (L^{0,3} + 2)$$

Für die drei Bereiche von D werden die Konstanten b aus den Gleichungen 1, 2 und 4 bestimmt. Das Resultat lautet:

$$0{,}8 \leqq D < 2 \quad P = 20\ (n/1000)^3\ D^{2,2}(L^{0,3} + 2) \tag{5a}$$
$$2 \leqq D < 4 \quad P = 4\ (n/1000)^3\ D^{4,5}(L^{0,3} + 2) \tag{5b}$$
$$4 \leqq D \leqq 6 \quad P = 1{,}7\ (n/1000)^3\ D^{5,1}(L^{0,3} + 2) \tag{5c}$$

Dabei sind D und L in m, n in U/min und P in kW einzusetzen.

7. Schlussbemerkung

Die drei Gleichungen (5) ermöglichen die Abschätzung der gesamten Ventilationsverluste vertikal gelagerter Synchronmaschinen. Diese Verluste wachsen mit der Eisenlänge nur schwach, mit der Statorbohrung dagegen stark an. Dabei zeigt es sich, dass der Einfluss der Statorbohrung nicht durch einen einzigen Exponenten ausgedrückt werden kann, sondern dass verschiedene Bereiche berücksichtigt werden müssen.

Literatur

[1] *J. Baer* und *I. Novosel:* Belüftungstechnische Auslegung rotierender elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner. Bull. SEV/VSE 66(1975)6, S. 313...317.
[2] *E. Wiedemann* und *W. Kellenberger:* Konstruktion elektrischer Maschinen. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1967.
[3] Hütte. Des Ingenieurs Taschenbuch. Maschinenbau, Teil A. 28. Auflage. Berlin, Verlag Wilhelm Erst und Sohn, 1954.

Adresse des Autors

Hans Teichmann, M. Sc. (Engineering), Centrale Thermique de Vouvry SA, 1896 Vouvry.