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: 67 (1976)

Heft: 12

Artikel: Zusatzverluste in Klauenpolmaschinen

Autor: Teichgräber, U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915177

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: 09.07.2025

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

Zusatzverluste in Klauenpolmaschinen

Von U. Teichgräber

621.313.12 : 621.3.017

Die asynchronen Luftspaltdrehfelder werden angegeben, die als Wicklungs- und Nutungsoberfelder in einem Klauenpolgenerator auftreten können. Sie werden im Gegensatz zum Grundfeld zweidimensional beschrieben, um das Eindringen der Wirbelströme in die massiven Klauenpole zu erfassen. Es zeigt sich, dass die asynchronen Drehfelder praktisch vollständig durch das massive Eisen des Polrades abgedämpft werden und nicht mit der Erregerspule gekoppelt sind. Die Wirbelstromverluste im Polrad werden in Abhängigkeit von der Belastung und vom Luftspalt dargestellt, und der Einfluss auf den Wirkungsgrad wird angegeben.

Les champs tournants asynchrones dans l'entrefer, qui peuvent se présenter dans un alternateur à pôles saillants à tenons sous forme de champs d'harmoniques d'enroulement et d'encoches, sont décrits. Contrairement au champ fondamental, ils sont considérés bidimensionnels, afin de tenir compte de la pénétration de courants de Foucault dans les pôles massifs à tenons. On constate que les champs tournants asynchrones sont presque complètement amortis par le fer massif de la roue polaire et ne sont pas couplés à la bobine d'excitation. Les pertes par courants de Foucault dans la roue polaire sont représentées en fonction de la charge et de l'entrefer, puis leur influence sur le rendement est indiquée.

1. Einleitung

Klauenpolmaschinen werden wegen ihrer robusten Bauweise überall dort verwendet, wo extrem rauhe Bedingungen herrschen und Wartungsfreiheit verlangt wird. Dies ist der Fall auf den öffentlichen Verkehrsmitteln und auf Kraftfahrzeugen allgemein [1; 2][1]). Die Maschinen dienen hier der Versorgung des Bordnetzes mit Gleichstrom, der aus dem Drehstrom über Gleichrichter erzeugt wird. In einigen Fällen wird die Drehstromleistung auch direkt zur Speisung von Wechselstromverbrauchern auf den Fahrzeugen benutzt [1]. Der Leistungsbereich der Maschinen reicht bei einer Drehzahl von 1000 U/min von 0,5 kW bei Lichtmaschinen bis zu 50 kW bei Heizgeneratoren und zur Speisung von Klimaanlagen.

In der schleifringlosen Ausführung haben die Klauenpolmaschinen keine rotierenden Wicklungen oder Leiter. Der Fluss der Erregerspule, die konzentrisch die Läuferwelle umfasst, verläuft dreidimensional innerhalb der beiden Polradhälften der Maschine. Während bei normalen Schenkelpolmaschinen jeder Pol von einer Erregerspule erregt wird, sind die Polpaare der Klauenpolmaschine in bezug auf ihre Erregung parallel geschaltet. In Fig. 1 ist der Verlauf einer Feldlinie durch ein Polpaar und durch den Ständer schematisch dargestellt. Wegen der hohen magnetischen Streuung zwischen den Klauenpolrädern wird bei starker Ausnutzung der Maschine der Vorteil, dass nur eine Erregerspule notwendig ist, in gewissem Masse kompensiert, denn die Ampèrewindungen müssen entsprechend der Streuung erhöht werden.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

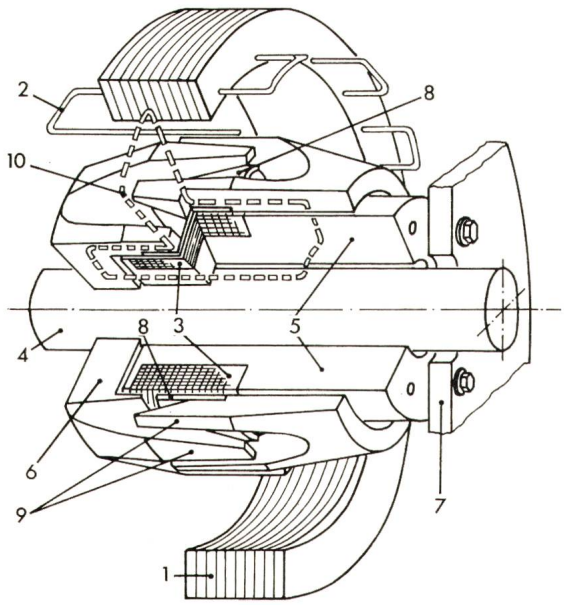

Fig. 1 Perspektivisches Schnittbild einer schleifringlosen Klauenpolmaschine

1 Ständer	6 Jochring rotierend
2 Ständerwicklung	7 Lagerschild
3 Erregerspule	8 unmagnetischer Ring
4 Läuferwelle	9 Klauenpole
5 Jochring fest	10 Feldlinie eines Polpaares

Mit Rücksicht auf die Selbsterregung der Generatoren und die thermische Belastung der Erregerspule wird der Luftspalt so klein wie möglich gewählt. Dies bedeutet, dass die nicht synchron umlaufenden Felder im massiven Polrad Wirbelströme erzeugen können. Bei einer stationären, dreiphasig symmetrischen Belastung sind die im Luftspalt auftretenden Oberfelder verantwortlich für die Zusatzverluste in den Klauenpolen. Diese Verluste bestimmen massgeblich den Wirkungsgrad und die thermische Belastbarkeit der Klauenpolmaschinen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur Vorausberechnung der Wirbelstromverluste in den massiven Polrädern angegeben. Um das Problem der Berechnung zugänglich zu machen, müssen zunächst einige Voraussetzungen und Idealisierungen getroffen werden.

2. Voraussetzungen

Das Polrad der Klauenpolmaschine wird zunächst als massiver Volltrommelläufer betrachtet, d. h., für den Rechenansatz werden die Pollücken vernachlässigt. Dies hat den Vorteil, dass man zu einer recht anschaulichen Beschreibung der elektromagnetischen Verhältnisse im massiven Eisen gelangt. Um ein Mass für die wirklichen Verluste zu erhalten, werden die errechneten Zusatzverluste um den Polbedeckungsfaktor reduziert.

Die Luftspaltfelder werden durch die axiale Begrenzung des Ständers und des Polrades nicht behindert. Dies bedeutet, dass ein unendlich langer Luftspalt in axialer Richtung angenommen wird, wodurch die Läuferströme im Eisen in Umfangsrichtung vernachlässigt werden. Diese Vereinfachung ist gerechtfertigt, da die Felder, die die Zusatzverluste verursachen, im allgemeinen von Oberfeldern mit hohen Polzahlen herrühren. Die Polteilungen dieser Drehfelder sind klein gegenüber der aktiven Länge der Klauenpolmaschine.

Die Permeabilität des Läufereisens wird als unabhängig von der sich zeitlich und räumlich ändernden Durchflutung angesehen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für die Überlagerung der verschiedenartigen Drehfelder.

Stromoberschwingungen durch nichtlineare Belastungen wie Eisensättigung und Kommutierung werden vernachlässigt. Die Stränge der dreiphasig symmetrischen Ständerwicklung sind im Stern verbunden und bestehen aus in Reihe geschalteten Spulengruppen.

3. Wirksame Oberfelder

In rotierenden Maschinen unterscheidet man hauptsächlich drei Arten von Oberfeldern mit verschiedener Herkunft: Wicklungsoberfelder, Leitwertoberfelder insbesondere Nutungsoberfelder und Sättigungsoberfelder.

Die Wicklungsoberfelder werden durch die diskrete Anordnung der stromführenden Leiter in Nuten verursacht. Ihre Amplitude ist direkt dem Leiterstrom proportional. Bei der analytischen Beschreibung dieser Felder wird von einer glatten Luftspaltfläche ausgegangen. Die Durchflutung der Nuten wird in unendlich schmale Nutschlitze an die Ständer- bzw. Läuferluftspaltflächen verlagert. Man erhält somit eine treppenförmige, periodische Verteilung der Felderregung entlang des Luftspaltes der Maschine. Diese Kurve lässt sich nach der Methode von Fourier als Summe von unendlichen Reihen darstellen. Jede einzelne Felderregerwelle erzeugt entsprechend der Drehfeldtheorie [3] ein Drehfeld

$$b_{\nu 0} = B_{\nu 0} \cdot \cos\left(\nu \frac{\pi}{\tau} x_1 - \omega t - \varphi\right) \quad (1)$$ [2)]

mit den Polpaarzahlen der Drehstromwicklung

$$\nu = p\,(6\,g_w + 1),\ g_w = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \quad (2)$$

Feldoberwellen, die durch periodische Leitwertschwankungen entstehen, ergeben sich aus dem Produkt von Leitwert- und Durchflutungswelle mit $\nu = p$:

$$b_{p\lambda} = B_{p\lambda} \cos\left[(p + \lambda) \frac{\pi}{\tau} x_1 - \omega t - \varphi\right] \quad (3)$$

Die Leitwertpolpaarzahlen lauten

$$\lambda = g_L \cdot N,\ g_L = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots \quad (4)$$

Es handelt sich hier lediglich um den Leitwert infolge der Ständernutung. Im Gegensatz zu den Wicklungsoberfeldern, die dem tatsächlichen Leiterstrom proportional sind, hängen die Leitwertoberfelder von der im Luftspalt herrschenden Induktion ab; sie sind dem aus der Ersatzvorstellung bekannten Magnetisierungsstrom I_m proportional.

Eine andere Form von Leitwertoberfeldern tritt bei Sättigungserscheinungen in den Ständerzähnen auf. Durch Abflachen der Feldwellen ergeben sich hier in erster Linie Felder der dreifachen Polpaarzahl und Frequenz. Diese Felder laufen also synchron mit dem Polrad um, induzieren keine Wirbelströme in den Klauenpolen und brauchen daher hier nicht betrachtet zu werden.

4. Rechengang

Die aufgeführten Felder der Ständerwicklung und des Leitwertes beschreiben die Normalkomponente der Luftspaltoberfelder. Um die elektromagnetischen Vorgänge im Polrad – insbesondere die Wirbelströme – richtig zu erfassen, genügt diese eindimensionale Darstellung nicht. Die Luftspalt- und Polradfelder müssen daher entgegen der klassischen Drehfeldtheorie ausser in normaler auch in tangentialer Richtung erfasst werden. Dazu dient das einfache Rechenmodell nach Fig. 2.

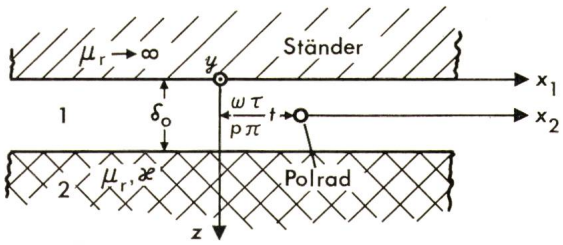

Fig. 2 Rechenmodell

Die Ständerwicklung werde von einer Durchflutungswelle mit der allgemeinen Polpaarzahl $\mu = \nu$ bzw. $\mu = p + \lambda$ erregt. In komplexer Schreibweise lautet die Felderregung:

$$v_\mu = V_\mu \cdot \exp j\left(\mu \frac{\pi}{\tau} \cdot x_1 - \omega t - \varphi_\mu\right) \quad (5)$$

In den beiden Bereichen Luftspalt (1) und Polrad (2), werden Vektorpotentiale definiert, die nach Voraussetzung entsprechend den Ständerströmen nur in axialer Richtung existieren. Im Luftspalt erfüllt der Ansatz

$$a_{1\mu y} = \left(D_1\, e^{-\zeta z} + D_2\, e^{\zeta z}\right) \cdot \exp j\left(\mu \frac{\pi}{\tau} x_1 - \omega t - \varphi_\mu\right) \quad (6)$$

die Laplacesche Differentialgleichung und im massiven Polrad der Ansatz

$$a_{2\mu y} = \left(R_1\, e^{-\xi z} + R_2\, e^{\xi z}\right) \cdot \exp j\left[\mu \frac{\pi}{\tau} x_2 - \left(1 - \frac{\mu}{p}\right) \omega t - \varphi_\mu\right] \quad (7)$$

die Poissonsche Differentialgleichung. Die Periodenkonstanten der Gl. (6) und (7) ergeben sich zu

$$\zeta = \mu \cdot \frac{\pi}{\tau} \quad (8)$$

und

$$\xi = \sqrt{\zeta^2 + j\,\mu_0\,\mu_r\,x\left(1 - \frac{\mu}{p}\right)\omega} \quad (9)$$

Aus der Definition des Vektorpotentials

$$\vec{b} = \mathrm{rot}\,\vec{a} \quad (10)$$

lassen sich die Radial- und Tangentialkomponenten der magnetischen Felder berechnen. Die elektrischen Felder, die nach Voraussetzung nur in axieler Richtung existieren, ergeben sich ebenfalls aus dem Vektorpotential, nach der allgemeinen Beziehung

$$\vec{e} = -\partial\vec{a}/\partial t \quad (11)$$

Die vier Integrationskonstanten, die zur Beschreibung der Felder notwendig sind, lassen sich aus den Randbedingungen an den Grenzflächen bestimmen. In der Ebene $z = 0$ liefert das Durchflutungsgesetz

$$b_{1\mu x1}\,(z = 0) = -\mu_0 \cdot \partial v_\mu / \partial x_1 \quad (12)$$

eine Bestimmungsgleichung für die Konstanten D_1 und D_2. An der Stelle $z = \delta_0$ geht die Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke und des Vektorpotentials stetig vom

[2)] Definition der Formelzeichen siehe im Anhang

Maschine	p	N	R cm	$\frac{b_z}{\tau_N}$	δ cm	l cm	n_N U/min	w	I_N A	w_e	I_{eN} A	α
A	4	48	9.05	0.87	0.075	7.5	1800	88	30	715	5.5	0.66
B	2	48	9.45	0.94	0.075	5.5	3000	22	80	665	5.5	0.65

Luftspalt in das Polrad über. Aus diesen Randbedingungen ergeben sich zwei weitere Bestimmungsgleichungen für die Integrationskonstanten. Mit der Annahme, dass die Felder bei $z = \infty$ verschwinden, wird die Konstante $R_2 = 0$, und man erhält das folgende Gleichungssystem in Matrizenschreibweise:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ \zeta\, e^{-\zeta/\Lambda_0} & -\zeta\, e^{\zeta/\Lambda_0} & \frac{\xi}{\mu_r} e^{-\xi/\Lambda_0} \\ e^{-\zeta/\Lambda_0} & e^{\zeta/\Lambda_0} & -e^{-\xi/\Lambda_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\mu_0 V_\mu \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

Um die gesamten Felder im Luftspalt und Polrad zu erhalten, müssen die Integrationskonstanten für alle in Frage kommenden Polpaarzahlen μ bestimmt werden. Die Polpaarzahlen der Wicklungsoberfelder sind nach Gl. (2):

$$\mu = p\,(6\,g_w + 1),\ g_w = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots \tag{14}$$

und die μ-te Amplitude der Felderregung lautet

$$V_\mu = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{w\, f_{\mu s}\, f_{\mu z}}{\mu} \sqrt{2} \cdot I \tag{15}$$

Dagegen setzen sich die Polpaarzahlen der Leitwertoberfelder aus der Maschinenpolpaarzahl p und den Leitwertpolpaarzahlen nach Gl. (4) zusammen:

$$\mu = p + g_L \cdot N,\ g_L = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots \tag{16}$$

Um die Nutung des Ständers in der Methode der zweidimensionalen Feldberechnung richtig zu erfassen, empfiehlt es sich, einen die Amplitude des Leitwertes kennzeichnenden Beiwert

$$k_\lambda = \Lambda_\lambda / \Lambda_0 \tag{17}$$

einzuführen [2]. Dieser Beiwert wird der Amplitude der Felderregung hinzugefügt:

$$V_\mu = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{w \cdot f_{ps}\, f_{pz}}{p}\, k_\lambda \sqrt{2} \cdot I_m \tag{18}$$

Damit wird erreicht, dass für die Berechnung sowohl der Wicklungs- als auch der Leitwertoberfelder das Gleichungssystem (13) uneingeschränkt anwendbar ist.

5. Zusatzverluste

Die Wirbelströme im Polrad, die dort die Zusatzverluste verursachen, fliessen unter den hier gemachten Voraussetzungen nur in axialer Richtung. Die Verluste lassen sich aus dem Quadrat der Stromdichte berechnen. Da die Polradströme vom Ständer her durch die Luftspaltfelder induziert werden und die elektrischen Felder auch bekannt sind, kann die Verlustleistung über den Poyntingschen Vektor an der Polradoberfläche ermittelt werden. Für ein elektromagnetisches Feld der Polpaarzahl μ erhält man die Komponente der Leistungsflussdichte in z-Richtung:

$$S_{\mu z} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{Re}\left[e_{2\mu y} \cdot b_{2\mu x_2}{}^*\right]_{z=\delta_0} \tag{19}$$

Mit der Polradluftspaltfläche A_p und dem Polbedeckungsfaktor α lautet die gesamte Polradverlustleistung

$$P_{vp} = \alpha A_p \sum_\mu S_{\mu z} \tag{20}$$

6. Spektrum der induzierten Ströme

In Tabelle I sind die charakteristischen Maschinendaten von zwei Klauenpolgeneratoren zusammengestellt. Maschine A ist ein typischer Bahnlichtgenerator, der über ein Getriebe direkt von der Achse eines Schienenfahrzeuges angetrieben wird. Die Drehzahl ist also der Zuggeschwindigkeit proportional. Ab 1800 U/min erreicht der Generator seine Nennleistung von 4,5 kW. Maschine B ist ein Strassenbahn-Umformergenerator mit der Nennleistung von 4 kW. Die Maschine wird mit der konstanten Drehzahl 3000 U/min von einem

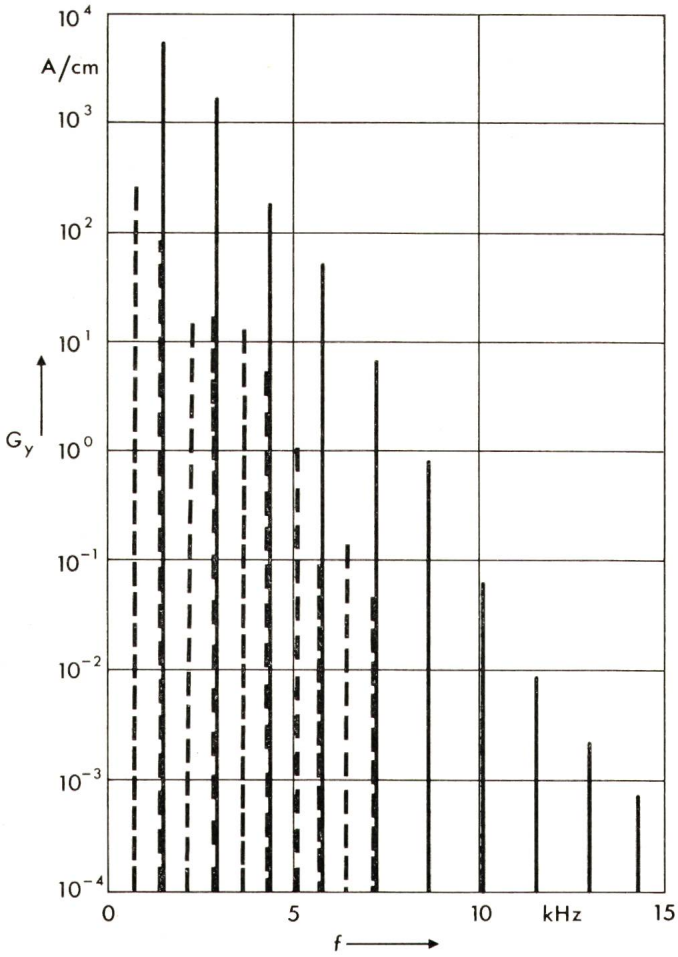

Fig. 3 Frequenzspektrum der Stromdichten G_y (Maschine A)
▬ ▬ ▬ Wicklung ▬▬▬ Leitwert

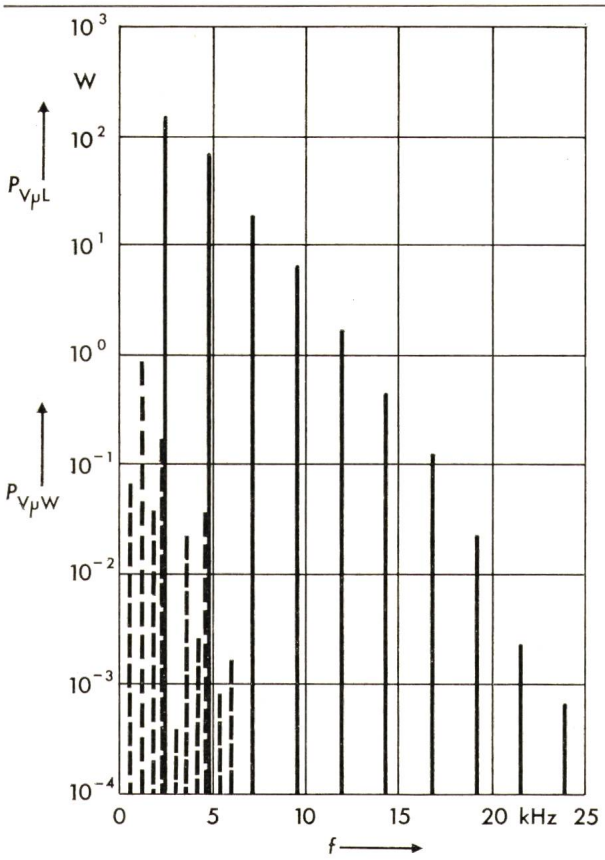

Fig. 4 Frequenzspektrum der Stromverluste P_V (Maschine B)
▬▬▬ Wicklung ▬▬▬ Leitwert

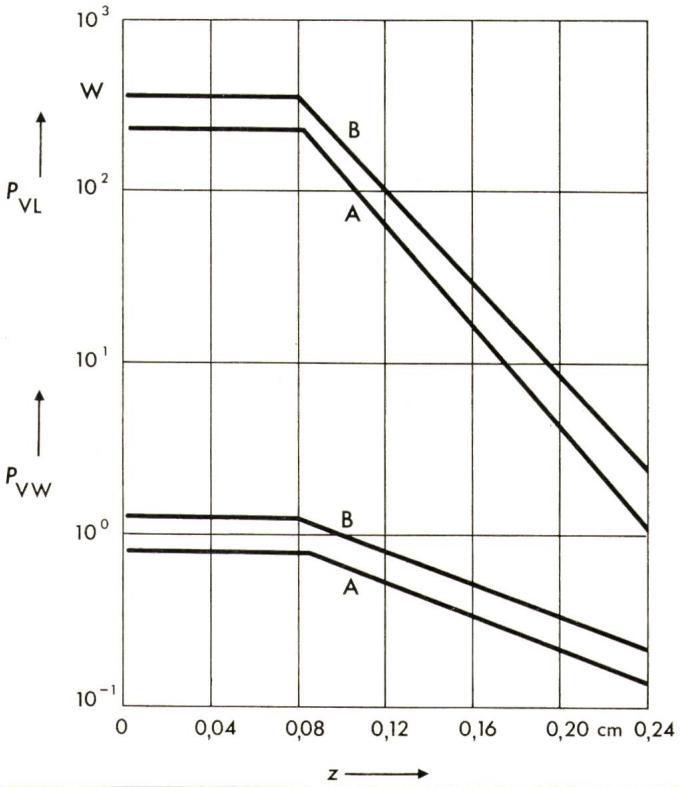

Fig. 5 Polradverluste P_V abhängig von der Eindringtiefe z (A, B Maschinentyp)

Gleichstrommotor angetrieben, der direkt von der Fahrdrahtspannung gespeist wird.

Die asynchronen Drehfelder bewegen sich, bezogen auf die Läuferkoordinate x_2 alle mit der Winkelgeschwindigkeit $\left(\frac{\mu}{p}-1\right)\frac{\omega}{\mu}$ in negativer Richtung. Die Ursache liegt darin, dass die Felder nach Voraussetzung lediglich mit der Grundkreisfrequenz ω erregt werden. Dies gilt auch für die Leitwertoberfelder, die hier durch die Modulation des Leitwertes mit dem Luftspaltgrundfeld beschrieben werden. Die Frequenzen der im Polrad induzierten Ströme $\left(1-\frac{\mu}{p}\right)\frac{\omega}{2\pi}$ ergeben sich aus den ganzzahligen Vielfachen von $3\omega/\pi$ und $\frac{N}{p}\frac{\omega}{2\pi}$ infolge der Ständerwicklung beziehungsweise des Luftspaltleitwertes.

Fig. 3 zeigt das Frequenzspektrum der Stromdichteamplituden an der Polradoberfläche für die Nenndaten der Maschine A, beschränkt auf $g_W, g_L = \pm 10$. Daraus geht hervor, dass die Stromdichteamplituden mit der Frequenz stark abnehmen. Während die durch den Luftspaltleitwert hervorgerufenen Stromdichten einen regelmässigen, exponentiellen Verlauf zeigen, verursachen die Nutharmonischen der Ständerwicklung eine unregelmässige Abhängigkeit der Stromdichte von der Frequenz. Weiterhin ist zu beobachten, dass sich die Stromdichteamplituden infolge der Wicklungsoberfelder um 1 bis 2 Zehnerpotenzen niedriger errechnen als diejenigen infolge der Leitwertoberfelder. Die Zusatzverluste im Polrad der Klauenpolmaschine werden also hauptsächlich von den Nutungsoberfeldern bestimmt, was aus Fig. 4 deutlich hervorgeht. Für die Nenndaten der Maschine B ist hier das Spektrum der Wirbelstromverluste dargestellt. Allein die ersten drei Ordnungszahlen des Leitwertes $g_L = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ verursachen mit den Stromfrequenzen 2,4, 4,8 und 7,2 kHz 95% der gesamten Verluste im Polrad. Der Anteil durch die Wicklungsoberfelder beträgt weniger als 1%. Diese Felder können daher bei der Bestimmung der Zusatzverluste vernachlässigt werden.

7. Eindringtiefe

Nach Gl. (20) ergeben sich die gesamten Zusatzverluste im Polrad der Klauenpolmaschine aus der Überlagerung der Wirbelstromverluste, die durch die asynchronen Feldoberwellen dort induziert werden. Die Berechnung der Verlustleistung über den Poyntingvektor nach Gl. (20) erlaubt die Darstellung der Verluste in Abhängigkeit von der Eindringtiefe. In Fig. 5 ist die Abnahme dieser Verluste in Richtung der z-Koordinate wiedergegeben. Der Verlauf der Kurven für die Maschinen A und B unterscheidet sich in der halblogarithmischen Darstellung nur geringfügig. Die Verluste durch die Wicklungsfelder P_{VW} sind verschwindend klein, sie nehmen aber mit der Eindringtiefe langsamer ab als die Leitwertverluste P_{VL}, da die Frequenzen der Stromdichten niedriger liegen. Der Einfluss der Stromfrequenzen ist auch aus der unterschiedlichen Steigung der Leitwertverluste beider Maschinen zu erkennen. Die Verluste der Maschine A werden, wenn auch geringfügig, im Polrad schneller abgebaut als bei der Maschine B. Bei gleicher Nutenzahl unterscheiden sich die Polzahl um den Faktor 2 und die Drehzahl um den Faktor 0,6, so dass die Frequenzen der induzierten Polradströme bei der Maschine A 1,2fach höher liegen als bei der Maschine B. Höhere Stromfrequenzen bedeuten geringere Eindringtiefen der Stromdichten.

Aus Fig. 5 geht weiterhin hervor, dass praktisch die gesamten Zusatzverluste, nämlich 99 %, von der Oberfläche des Polrades bis zu einer Tiefe von 1 mm entstehen. In den ersten 0,5 mm werden bereits 90 % der Verluste erzeugt.

Die Wirbelstromverluste im Polrad der Klauenpolmaschine hängen ausser von den Stromfrequenzen auch noch von der elektrischen Leitfähigkeit und der örtlichen Permeabilität des massiven Eisens ab. Während die elektrische Leitfähigkeit als feldunabhängig zu betrachten ist, ergibt sich die Permeabilität aus dem nichtlinearen Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Induktion. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der magnetische Zustand der Klauenpole lediglich durch das Hauptgleichfeld der Maschine geprägt wird. Die hohen Stromdichten in den Schichten nahe der Polradoberfläche führen dort zu starken magnetischen Feldern, die eine örtlich unterschiedliche Permeabilität hervorrufen. Die Berücksichtigung der feldabhängigen Permeabilität bei der Bestimmung der elektromagnetischen Felder bedeutet einen erheblich höheren Rechenaufwand. Eine Näherungsmethode bietet die Aufteilung der Klauenpole in mehrere luftspaltparallele Schichten, in denen die Permeabilitäten iterativ und schichtweise konstant ermittelt werden [4].

8. Reduzierung der Wirbelstromverluste

Die Verluste im massiven Polrad einer Klauenpolmaschine lassen sich messtechnisch nicht von anderen Zusatzverlusten trennen. Die Wirbelströme werden hauptsächlich durch das über den Luftspaltleitwert modulierte Hauptfeld induziert. Die herkömmlichen Zusatzverluste, die sich in der Regel aus einem Kurzschlussversuch ermitteln lassen, bestehen nur zu einem geringen Teil aus den Polradverlusten. In diesem Betrieb ist das Luftspaltfeld sehr schwach, und die Wirbelströme durch Wicklungsoberfelder können vernachlässigt werden.

Die Polradzusatzverluste in Klauenpolmaschinen werden im Leerlaufversuch nachgewiesen. Sie lassen sich aber in der Messung nicht von den Magnetisierungsverlusten trennen. Fig. 6 zeigt für die Maschine B die gemessenen Leerlaufverluste P_{V0} – vermindert um die Reibungsverluste – und die errechneten Polradverluste P_{VP} in Abhängigkeit der Leerlaufspannung. Die Differenz aus der gemessenen und berechneten Kurve ergibt den Verlauf der Magnetisierungsverluste P_{VM}, die im Ständer der Maschine auftreten.

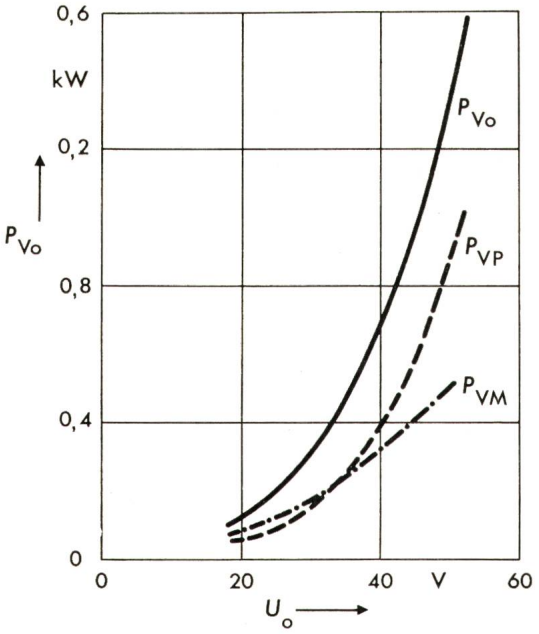

Fig. 6 Leerlaufverluste (Maschine A)
gemessene Gesamtverluste P_{V0}
berechnete Polradverluste P_{VP}
Magnetisierungsverluste P_{VM}

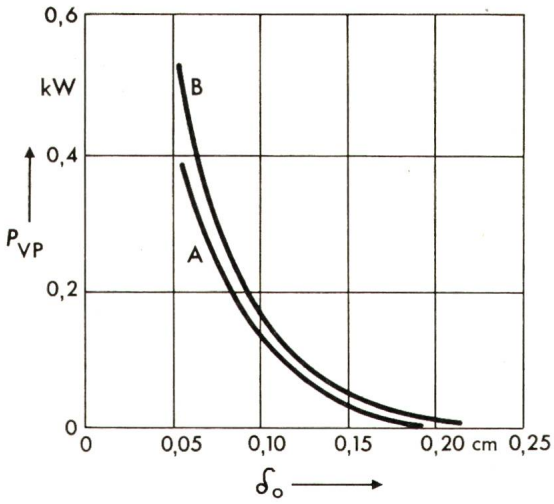

Fig. 7 Zusatzverluste P_{VP} abhängig vom mittleren Luftspalt δ_0

Eine Möglichkeit, die relativ hohen Zusatzverluste im massiven Klauenpolrad zu vermindern, bietet die Luftspaltvergrösserung. In Fig. 7 sind die Verluste P_{VP} in Abhängigkeit des mittleren Luftspaltes δ_0 dargestellt. Die abgegebene Leistung der Generatoren ist bei der Berechnung der Kennlinien konstant gehalten, so dass die Erregerdurchflutung entsprechend der Vergrösserung des Luftspaltes erhöht werden muss. Das Diagramm macht deutlich, wie stark die Polradverlustleistung mit dem mittleren Luftspalt abnimmt. Dieser entspricht nicht dem geometrischen Wert, sondern dem aus der Fourieranalyse gewonnenen arithmetischen Mittel. Die Amplituden der Nutungsoberfelder in der zweidimensionalen Darstellung nehmen an der Polradoberfläche exponentiell ab, so dass auch bei Vergrösserung des Erregerstromes die induzierten Wirbelströme im Polrad geringer werden. Der höhere Strom in der Erregerspule verursacht dort entsprechend stärkere Erregerverluste. Dies bedeutet, dass der Luftspalt nicht beliebig vergrössert werden kann, um die Polradverluste kleinzuhalten. Gerade bei selbstbelüfteten Klauenpolmaschinen stellt die Erregerspule die thermisch begrenzende Wicklung dar. Bei der Auslegung dieser Maschinen wird empfohlen, auf eine thermisch gleichmässige Belastung des Klauenpolrades zu achten. Dies bedeutet, dass im Dauerbetrieb Polradzusatzverluste und Erregerleistung von gleicher Grössenordnung sein sollten.

Eine wirksame Methode, die Zusatzverluste im Polrad ohne einen entsprechend höheren Erregerbedarf herabzusetzen, bietet die Bearbeitung der Polradoberfläche. Die Klauenpole werden an ihrer Luftspaltfläche mit 0,5...1 mm tiefen Schlitzen in axialer oder radialer Richtung versehen. Die Schlitze sollten dabei so schmal wie möglich gemacht werden. Diese fertigungstechnisch sehr aufwendige Bearbeitung stellt eine Luftspalterweiterung dar, die einerseits eine Abnahme der Verluste etwa nach Fig. 7 bewirkt, anderseits aber keinen so grossen Erregerbedarf erfordert.

Der Wirkungsgrad der Klauenpolmaschinen liegt etwa bei 75 %. Bei einer optimalen Auslegung dieser Maschinen entstehen ungefähr 25 % der Gesamtverluste durch Wirbelströme im massiven Polrad. Mit sehr feinen Schlitzen in der Oberfläche der Klauenpole können die Zusatzverluste auf 5 % reduziert werden, womit eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf etwa 80 % erreicht wird.

Anhang

Formelzeichen	Bedeutung
A_p	Polradluftspaltfläche
b_z	Zahnbreite
f_s, f_z	Sehnungsfaktor, Zonenfaktor
l	aktive Maschinenlänge
N	Nutenzahl
n	Drehzahl
p	Grundpolpaarzahl
R	Bohrungsradius
w, w_e	Windungszahl: Ständerwicklung, Erregerspule
W, L	Index für Wicklung, Leitwert
α	Polbedeckungsfaktor
δ_0	mittlerer Luftspalt
τ	Polteilung
τ_N	Nutteilung
1, 2	Index für Ständer-, Polradgrösse
e	Momentanwert der elektrischen Feldstärke
G	Stromdichte-Amplitude
I, I_m, I_e	Strang-, Magnetisierungs-, Erregerstrom
$k_\lambda = \Lambda_\lambda/\Lambda_0$	bezogener Leitwert
P_v	Verlustleistung
S_z	Poyntingvektor, Komponente in z-Richtung
U_0	Leerlaufspannung an der Maschine
$\varkappa$	Leitfähigkeit der Klauenpole
ν, λ	Polpaarzahl: Wicklungs-, Leitwertfelder
φ	Phasenwinkel
μ_0	Induktionskonstante
μ_r	Permeabilität der Klauenpole
μ	Polpaarzahl allgemein
a	Momentanwert des Vektorpotentials
B, b	Amplitude, Momentanwert des Luftspaltfeldes
V, v	Amplitude, Momentanwert der Felderregung
Λ_0	mittlerer Leitwert
ω	Kreisfrequenz
g_w, g_L	Ordnungszahl: Wicklung, Leitwert
N	Index für Nenngrösse
x_1, x_2	Längskoordinate bezogen auf Ständer, Polrad
y, z	Axial-, Normalkoordinate

Literatur

[1] *U. Teichgräber:* Betriebsverhalten eines Klauenpolgenerators mit zwei dreiphasigen Ständerwicklungen. Wiss. Ber. AEG-Telefunken 45(1972)4, S. 174...181.

[2] *U. Teichgräber:* Beitrag zur Theorie der Klauenpolmaschine. Dissertation der Technischen Universität Hannover, 1973.

[3] *H. Jordan* und *M. Weis:* Asynchronmaschinen. Uni-Text. Braunschweig, Vieweg, 1969.

[4] *U. Teichgräber:* Der einseitige Linearmotor mit massivem Eisenrückschluss. ETZ-A 96(1975)11, S. 528...532.

Adresse des Autors

Dr. Ing. *Utz Teichgräber,* Fachbereich Grossmaschinen, Entwicklung, AEG-Telefunken, Brunnenstrasse 107a, D-1000 Berlin 65.

Comité européen de Normalisation Electronique (CENELEC)

Tagung des TC 20 vom 5. bis 7. Mai 1976 in Zürich

Das TC 20 des CENELEC führte vom 5. bis 7. Mai 1976 in Zürich unter Leitung von S. Furlani (I) seine 7. Tagung durch, an der rund 40 Fachleute aus 12 Ländern teilnahmen. Die Schweiz war durch 4 Delegierte vertreten.

Anschliessend an die Genehmigung und Verdankung des Protokolls der vorangegangenen Tagung folgte eine kurze Orientierung über Korrespondenzen und eine Aussprache betreffend die Übernahme der CEI-Publikation 287, Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent, 331, Caractéristiques des câbles électriques résistant au feu, und 229, Essai de revêtement de protection contre la corrosion des gaines métalliques de câbles. Es wurde beschlossen, die Publikation 287 nicht zu übernehmen, da sie veraltet und in Überarbeitung ist und für die beiden andern Publikationen den Nationalkomitees Fragebogen bezüglich der Übernahme zuzustellen.

Anhand des Dokumentes *CENELEC/TC 20(SEC-Zürich)1* berichtete anschliessend der Sekretär über den gegenwärtigen Stand der Übernahme der Harmonisierungsdokumente *21,* Niederspannungskabel mit PVC-Isolation, und *22,* Niederspannungskabel mit Gummiisolation, durch die Nationalkomitees.

Dann orientierten die Vorsitzenden der Arbeitsgruppen über den Stand der Arbeiten. Dem Bericht über die Arbeit der WG 2, Technische Regeln für die ◁HAR▷-Markierung der harmonisierten Kabel und Schnüre, folgte eine sehr ausführliche Diskussion, in der es um die Sicherstellung einer einwandfreien Kabelqualität ging. Schwierigkeiten bestehen vor allem, weil in verschiedenen Ländern, welche solange ihre gesetzlichen Bestimmungen nicht geändert sind, neben der ◁HAR▷-Markierung noch nationale Konformitätskennzeichen anbringen müssen.

Es wurde beschlossen, eine Arbeitsgruppe aus Mitgliedern des TC 20 und des Marks-Komitees zu bilden zur Behandlung der aktuellen Probleme der Kabelkennzeichnung.

Das Harmonisierungsdokument *321,* Typenbezeichnungen der Kabel und Schnüre in den Dokumenten *HD 21* und *22,* wurde mit einer Stimmenthaltung (DK) und zwei ablehnenden Stimmen (CH und N) angenommen. Dagegen ist das Dokument *CENELEC/TC 20(SEC)465/465A,* Kabelbezeichnungs-System, als Harmonisierungsdokument mit drei Nein-Stimmen (CH, N, UK) abgelehnt worden.

Die WG 3 wurde beauftragt, die Bemerkungen von B, F und UK über die Kabelbeschriftung zu überprüfen und einen neuen Vorschlag auszuarbeiten.

Ein Beobachter der EG, der an dieser Tagung teilnahm, vertrat die Auffassung, dass Dimensionsnormen nicht zwingend seien und dass daher Querschnitte und Isolationswandstärken nicht eingehalten werden müssen, wenn dadurch die Sicherheit nicht beeinträchtigt wird. Diese Auffassung erregte etwas Aufsehen. Aus Zeitgründen brach der Vorsitzende die Diskussion über diese Fragen ab und bat die verschiedenen Votanten, ihre Meinung zu diesem Problem schriftlich einzureichen.

Die WG 5 wurde beauftragt, einen Entwurf für Prüfbestimmungen für Kabelzubehör auszuarbeiten.

Dann kamen einige Fragen zur Behandlung, die für das TC 20 und die Technischen Komitees 61, 64 und 313 des CENELEC von gemeinsamem Interesse sind.

Das Haupttraktandum dieser Tagung betraf die beiden Harmonisierungsdokumente 21 und 22. Anhand der Stellungnahmen *CENELEC/TC 20(S)16, CENELEC/TC 20(N)14* und *CENELEC/TC 20(SF)17* wurden die heute gültigen Standpunkte der nordischen Länder diskutiert. Schweden ist bereit, diese Dokumente ohne Abweichungen zu übernehmen. Finnland und Norwegen wünschen für den Kältebiegetest eine tiefere Temperatur von –25 °C anstelle von –15 °C. Österreich und die Schweiz können den Dokumenten nur mit A- und B-Abweichun-