Die Eisenverluste in elliptischen Drehfeldern

Radt, Martin

Berlin, 1911

4. Die Wirbelstromverluste in elliptischen Drehfeldern

urn:nbn:de:bsz:31-274924

senkrechten Wechselfelder B_1 und B_2 eingetragen, während die ursprünglich angenommenen Felder B_1' und B_2' nicht mehr eingezeichnet sind.

Diese Zerlegung des elliptischen Feldes in zwei Drehfelder ist nicht streng richtig, da die Sättigung des Eisens dabei unberücksichtigt bleibt. In Wirklichkeit besitzt das elliptische Drehfeld in der großen Achse eine mehr abgeflachte Feldkurve als in der kleinen Achse. Solange die Induktion im Eisen aber nicht sehr groß ist, ist der hierbei gemachte Fehler für technische Berechnungen noch zulässig.

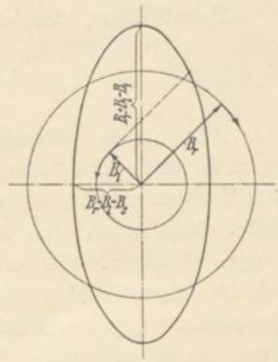

Fig. 3. Entstehung eines elliptischen Drehfeldes aus zwei gegenläufigen Kreisdrehfeldern ungleicher Amplitude.

4. Die Wirbelstromverluste in elliptischen Drehfeldern.

Da die Periodenzahl des elliptischen Drehfeldes entsprechend den beiden Drehfeldern eine zusammengesetzte ist, Ströme verschiedener Periodenzahl sich aber in demselben Leiter gegenseitig nicht beeinflussen, können wir die Wirbelstromverluste für die beiden Drehfelder einzeln berechnen und dann addieren. Es ist also der gesamte Wirbelstromverlust

$$W_w = \sigma_w c^2 \Delta^2 \left[B_r^2 \left(1 - \frac{c_r}{c}\right)^2 + B_l^2 \left(1 + \frac{c_r}{c}\right)^2 \right] V \cdot 10^{-10} \text{ Watt.}$$

$$c_r = \frac{p\,n}{60} = \frac{p\,\omega_r}{2\,\pi}$$

ist die Periodenzahl der Rotation. Wir wollen nun den Verlust durch die Amplituden der Wechselfelder B_1 und B_2, also durch die Halbachsen der Ellipse, ausdrücken und setzen

$$\frac{B_2}{B_1} = k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Es ist dann

$$W_w = \sigma_w c^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{2}\right)^2 \left(1 - \frac{c_r}{c}\right)^2 + \left(\frac{B_1 - B_2}{2}\right)^2 \left(1 + \frac{c_r}{c}\right)^2 \right] V \cdot 10^{-10}$$

$$W_w = \sigma_w c^2 \Delta^2 \frac{B_1^2}{4} \left[(1 + k)^2 \left(1 - \frac{c_r}{c}\right)^2 + (1 - k)^2 \left(1 + \frac{c_r}{c}\right)^2 \right] V \cdot 10^{-10}$$

$$W_w = \tfrac{1}{2}\,\sigma_w \left(\Delta \frac{c}{100} \frac{B_1}{1000}\right)^2 \left[\left(k - \frac{c_r}{c}\right)^2 + \left(1 - k\frac{c_r}{c}\right)^2 \right] V \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Der Faktor, der das elliptische Feld berücksichtigt, ist also:

$$k_{wr} = \tfrac{1}{2}\left[\left(k - \frac{c_r}{c}\right)^2 + \left(1 - k\frac{c_r}{c}\right)^2\right].^{1)}$$

Für einen ruhenden Anker im Wechselfelde ($k = 0$, $c_r = 0$) ist z. B. unter der Annahme eines in allen Fällen gleichbleibenden σ_w der Verlust nur halb so groß wie in einem Drehfelde gleicher Amplitude. Man kann sich übrigens dieses Resultat auch auf folgendem Wege ableiten. In einem Drehfelde erhält jeder radiale Querschnitt einmal die volle Induktion B, der Verlust ist also für alle Querschnitte proportional B^2. Beim Wechselfelde erhält nur ein Querschnitt die volle Induktion, während die Induktion in den anderen Querschnitten bis zur neutralen Zone hin nach einer Sinusfunktion abnimmt. Nehmen wir nun den Mittelwert des Verlustes für alle Querschnitte, so finden wir ihn deshalb proportional $\frac{1}{2} B^2$.

Den Verlust in den Zähnen berechnet man in bekannter Weise mit Hilfe eines Korektionsfaktors k_5,[2]) der die ungleiche Verteilung der Induktion über die Zahnhöhe berücksichtigt. Für die Statorzähne bekommen wir z. B. nach Gl. 10 den Verlust

$$W_{zw} = \frac{k_5}{2}\,\sigma_w\left(\Delta\frac{c}{100}\,\frac{B_{z\,min}}{1000}\right)^2(1 + k^2)\,V_z \text{ Watt.}$$

Enthält die Feldkurve höhere Harmonische, deren Größe neben der Grundharmonischen in Betracht kommt, so muß der Verlust für jede Harmonische nach Gl. 10 besonders berechnet werden. Wird das elliptische Feld z. B. durch ein Zweiphasensystem erzeugt, so bekommen wir sämtliche ungeraden Oberfelder des Grundstromes, die elliptische Drehfelder erzeugen, die je nach der Ordnungszahl der Oberfelder mit verschiedenen Geschwindigkeiten teils gleichsinnig, teils gegenläufig sich bewegen. Bei Motoren, die mit Bürstenverstellung arbeiten, können dabei noch besondere Komplikationen auftreten. In Fig. 4 sind über den Polteilungen $AC = BD$ zwei Feldkurven in ihrer räumlichen Lage zueinander gezeichnet. Die Feldkurven mögen beliebige Form haben, wir denken sie uns in ihre Harmonischen aufgelöst, von denen in Fig. 4 die erste und dritte gezeichnet sind. Die Felder selbst sollen Wechselfelder sein. Ist nun die Feldkurve St gegen die Feldkurve R räumlich um 90° verschoben, liegt also der Punkt B in M, und ist die Phasenverschiebung der die Felder erzeugenden Ströme 90°, so bilden die ersten Harmonischen rechtsrotierende Drehfelder, die dritten links-

[1]) Zu dem gleichen Resultate ist auf anderem Wege auch R. Rüdenberg gelangt, E. u. M. 1907, S. 533.

[2]) s. E. Arnold, Gleichstrommaschine, Bd. I.

rotierende usw. Verschieben wir nun durch Verstellung der Bürsten die Feldkurven räumlich gegeneinander, so daß z. B. die in der Figur gezeichnete Lage entsteht, so erhalten wir wieder elliptische Drehfelder, nur sind die Ellipsen jetzt etwas mehr gestreckt, da die räumlichen Richtungen der Felder näher beieinander liegen. Kommt bei einer weiteren Verschiebung Punkt B nach E, so stimmt die räumliche Richtung der dritten Oberfelder beider Feldkurven überein. Die dritten Harmonischen liefern jetzt keine Drehfelder mehr, sondern Wechselfelder, die mit der Grundperiodenzahl variieren, und deren Amplitude $A_3 = \sqrt{A_{St3}^2 + A_{R3}^2}$ ist. Dieselbe Erscheinung, das Entstehen von Wechselfeldern höherer Polzahl, tritt unter entsprechenden Umständen auch für alle übrigen Harmonischen auf. Der Faktor k ist also für das elliptische Drehfeld jeder Harmonischen ein anderer, so daß zur Verlustberechnung neben der Amplitude der Harmonischen auch jedesmal k bekannt sein müßte. Für den praktischen Maschinenbau sind solche Rechnungen natürlich undurchführbar, und es müssen die Verluste durch die höheren Harmonischen durch einen Zuschlag berücksichtigt werden.

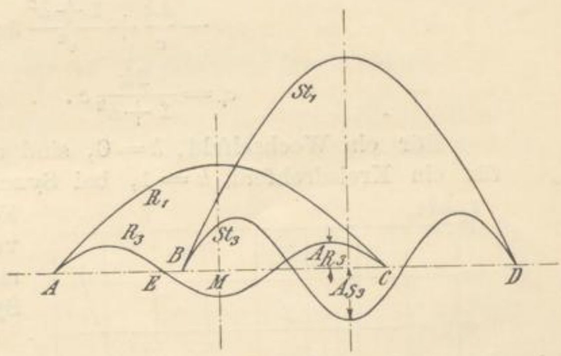

Fig. 4.

Wechselfelder höherer Ordnung entstehen übrigens in Drehfeldern auch noch unter anderen Verhältnissen. Wird z. B. ein elliptisches Drehfeld von einem Dreiphasensystem erzeugt, durch das Zusammenwirken von drei um 120° räumlich und zeitlich verschobener Wechselfelder, von denen eines eine kleinere Amplitude hat als die beiden anderen, so erhalten wir elliptische Drehfelder der fünften, siebenten, elften, dreizehnten usw. Polzahl und Wechselfelder von 3-, 9-, 15- usw. facher Polzahl des Grundfeldes.

Der Faktor $\left(k - \frac{c_r}{c}\right)^2 + \left(1 - k\frac{c_r}{c}\right)^2$ lehrt, daß die Wirbelstromverluste von Stillstand an mit zunehmender Geschwindigkeit des Rotors abnehmen, ein Minimum erreichen und dann fortgesetzt wachsen. Die Umdrehungszahl, bei der das Minimum auftritt, ist von k abhängig. Um das Minimum zu finden, differenzieren wir den Ausdruck.

Es ist

$$\frac{d}{d c_r}\left[\left(k-\frac{c_r}{c}\right)^2+\left(1-k\frac{c_r}{c}\right)^2\right]=0$$

$$-\frac{4k}{c}+\frac{1+k^2}{c^2}\,2c_r=0$$

$$c_r=\frac{2k}{1+k^2}\,c\,. \qquad \text{(11)}$$

Für ein Wechselfeld, $k=0$, sind die Verluste bei Stillstand, für ein Kreisdrehfeld, $k=1$, bei Synchronismus am geringsten. Für alle übrigen Achsenverhältnisse liegt das Minimum zwischen Stillstand und Synchronismus.

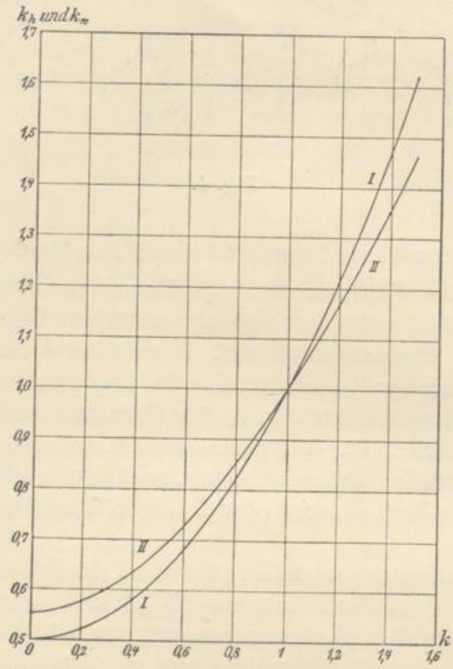

Fig. 5. I Faktor k_w zur Berechnung der Wirbelstromverluste im Stator.
II Faktor k_h zur Berechnung der Hysteresisverluste im Stator.

Für die Wirbelstromverluste im Wechselfeld

$$(k=0)$$

nimmt der Faktor die Form

$$\frac{1}{2}\left[1+\left(\frac{c_r}{c}\right)^2\right]$$

an. Die Verluste bestehen also aus einem konstanten Gliede, das durch die Periodenzahl c bedingt ist, und aus einem mit der Rotorgeschwindigkeit wachsenden Teil. Die vom Stator auf den Rotor übertragenen Wirbelstromverluste sind also, ob sich der Rotor dreht oder nicht, immer die gleichen. Die bei Rotation hinzukommenden Verluste werden mechanisch gedeckt. Dies Verhalten ist auch leicht zu verstehen, da der Statorstrom keine Verluste decken kann, die eine andere Periodenzahl als er selbst haben.

Die Wirbelstromverluste des Statoreisens sind im elliptischen Felde

$$\tfrac{1}{2}(1+k^2)=k_w$$

von denen im Kreisdrehfelde. Um die Berechnung zu erleichtern, ist dieser Faktor in Fig. 5, I, als Funktion von k aufgetragen.

Ebenso sind in Fig. 6 für verschiedene Werte von k Kurven des Faktors k_{wr} zur Berechnung der Wirbelstromverluste im Rotor als Funktion von $\frac{c_r}{c}$ aufgetragen.

5. Die Hysteresisverluste in elliptischen Drehfeldern.

Beim zyklischen Ummagnetisieren von Eisen tritt bekanntlich ein Zurückbleiben des Magnetismus der Eisenteilchen hinter der

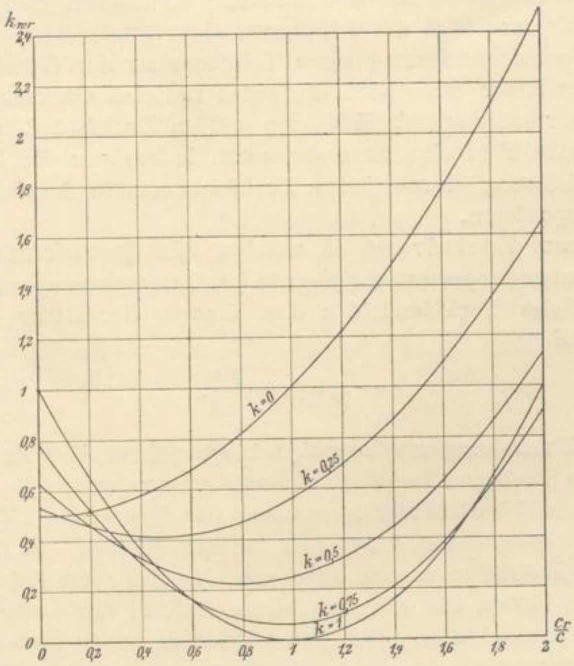

Fig. 6. Faktor k_{wr} zur Berechnung der Wirbelstromverluste im Rotor.

magnetisierenden Kraft auf, wodurch Wärmeverluste bedingt werden. Neben dieser, Hysteresis genannten Erscheinung beobachtet man ferner, daß bei Änderung der magnetisierenden Kraft das Eisen nicht sofort den entsprechenden magnetischen Zustand annimmt, sondern daß eine kleine Zeit verstreicht, bis dieser erreicht wird. Diese „Viskosität" des Eisens ist aber nur von untergeordneter Bedeutung.

Nach Steinmetz berechnet man bei zyklischer Ummagnetisierung zwischen zwei entgegengesetzt gleichen Induktionen den Verlust durch Hysteresis mit Hilfe der empirischen Formel