TRENNUNG DER MECHANISCHEN VERLUSTE UND DER EISENVERLUSTE BEI PERMANENT ERREGTEN SYNCHRONMASCHINEN

EUGEN NOLLE, NIKOLAUS NEUBERGER, DIMITRIJ KUJAT, MYKOLA KUVAIEV

Für anspruchsvolle Antriebsaufgaben werden zunehmend kompakte, robuste, drehzahlvariable und leicht regelbare elektrische Antriebe mit gutem Wirkungsgrad gefordert, die sich derzeit am besten mit permanent erregten Synchronmaschinen (peSM) realisieren lassen. Im Zuge der Antriebsoptimierung werden dann unter anderem detaillierte Kenntnisse über die Motoreigenschaften benötigt, die man in der Regel aus Prüffeldmessungen bestimmen muss. Zur Vorausberechnung des Betriebsverhaltens stützt man sich dabei üblich auf die Auswertung einer geeigneten Ersatzschaltung, in der zum Beispiel die Eisenverluste durch einen Eisenverlustwiderstand erfasst und die mechanischen Verluste direkt bei der Wellenleistung berücksichtigt werden. Wegen der bei peSM unveränderlichen Erregung durch die eingebauten Permanentmagnete ergibt sich das Problem, dass die mechanischen und die Eisenverluste stets gemeinsam als Leerlauf-Gesamtverluste auftreten und sich messtechnisch nicht direkt trennen lassen. Im Rahmen einer im Wintersemester 2010/11 an der Hochschule Esslingen durchgeführten Bachelorarbeit wurde unter anderem das nachfolgend vorgestellte und begründete Verfahren zur Trennung der mechanischen Verlusten von den Eisenverlusten entwickelt.

AUFNAHME DER LEERLAUFKENNLINIEN BEI PESM

Die konkreten Motoreigenschaften lassen sich im Prüffeld allg. aus Widerstandsmessungen, sowie dem Leerlauf- und dem Kurzschlussversuch bestimmen. Da die Erregung bei peSM durch die eingebauten Permanentmagnete unveränderlich vorgegeben ist, werden die Leerlaufkennlinien hier üblich auf dem Prüfstand mit offenen Statorwicklungen punktweise bei unterschiedlichen Drehzahlen als

$$U_{10}(n) \text{ und } M_0(n)$$

aufgenommen. Diese Messwerte sind beispielhaft für die in der Bachelorarbeit [1] untersuchte Transversalflussmaschine (TFM), die eine Sonderform der peSM ist, in Abb. 1 dargestellt.

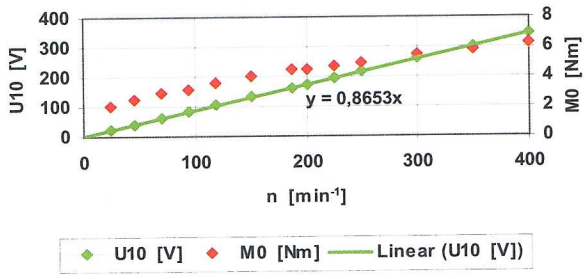

Abb. 1: Messwerte der Leerlaufkennlinien (Quelle: Hochschule Esslingen)

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. (NBU) Eugen Nolle lehrt an der Hochschule Esslingen Elektrische Maschinen in der Fakultät Mechatronik und Elektrotechnik und ist Leiter des Labors Elektrische Antriebe und Anlagen.

Dr.-Ing. Nikolaus Neuberger arbeitet an der Hochschule Esslingen als Laboringenieur im Labor Elektrische Antriebe und Anlagen der Fakaultät Mechatronik und Elektrotechnik.

Dimitrij Kujat war Student der Fakultät Mechatronik und Elektrotechnik der Hochschule Esslingen und untersuchte im Rahmen seiner Bachelorarbeit im Labor Elektrische Antriebe und Anlagen eine Transversalflussmaschine.

Mykola Kuvaiev ist Absolvent der NBU, Ukraine und hat als Stipendiat des Instituts für Angewandte Forschung Mechatronik am Standort Göppingen im Labor Elektrische Antriebe Anlagen die Software für den neuen Prüfstand für Torquemotoren entwickelt, auf dem die hier beschriebene TFM vermessen wurde.

Dabei wird für die Leerlaufspannung U_{10} eine Ursprungsgerade erwartet, welche z. B. in der Exceltabelle als Trendlinie mit guter Genauigkeit in der Form

$$U_{10} = c_U \cdot n = 0{,}8653\,\mathrm{V} \cdot \frac{n}{\mathrm{min}^{-1}}$$

direkt angegeben werden kann.

Demgegenüber ergibt sich für das dort ebenfalls dargestellte, zum Leerlaufbetrieb erforderliche, Antriebsmoment M_0 kein unmittelbar ersichtlicher Trend, so dass auf dieser Basis auch keine zuverlässige Extrapolation auf die Drehzahl 0 zur Trennung der Leerlaufverluste möglich ist.

DIE FREQUENZABHÄNGIGKEIT DER LEERLAUFVERLUSTE

Wie in [2] gezeigt wird, setzen sich die Leerlaufverluste bei peSM mit guter Genauigkeit additiv aus den Anteilen

P_{vR} = Reibungsverluste ~ n

P_{vL} = Lüftungsverluste ~ n^3

P_{vFe} = Eisenverluste ~ $n^{1,6}$

zu den Leerlauf-Gesamtverlusten

$$P_0 = P_{vR} + P_{vn} + P_{vFe} \approx P_{vR} + P_{vFe}$$

zusammen.

Wegen der hier beabsichtigten Extrapolation auf die Drehzahl $n = 0$ werden dazu vorteilhaft Messwerte bei kleineren Drehzahlen ausgewertet, so dass dann die Lüftungsverluste, wie bereits mit angegeben, näherungsweise vernachlässigt werden können.

Für das aufzuwendende Leerlaufmoment M_0 folgt somit die Drehzahlabhängigkeit

$$M_0 = \frac{P_0}{\omega} \approx \frac{P_{vR} + P_{vFe}}{2\pi n} = M_{vR} + M_{vFe}$$

mit

$$M_{vR} = \mathrm{const.} \quad \text{bzw.} \quad M_{vFe} \sim n^{0,6}.$$

Stellt man nun M_0 nicht über der Drehzahl selbst, sondern über $x = (n/\mathrm{min}^{-1})^{0,6}$ dar, so kann entsprechend Abb. 2 wieder eine lineare Abhängigkeit erwartet werden.

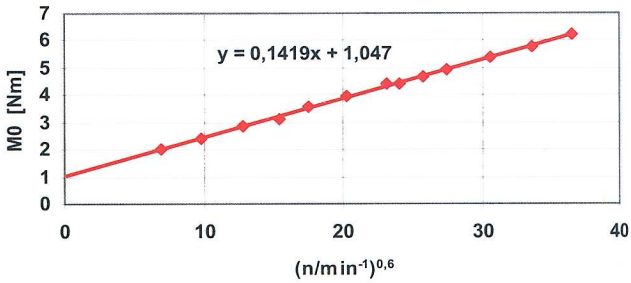

Abb. 2: Modifizierte Trendlinie für das Leerlaufmoment (Quelle: Hochschule Esslingen)

In der dort ebenfalls angezeigten linearen Trendliniengleichung der Form

$$y = ax + b \text{ mit } a = 0{,}1419\,\mathrm{Nm} \text{ und } b = 1{,}047\,\mathrm{Nm}$$

stellt $a \cdot x = M_{vFe} = 0{,}1419 \cdot x$ Nm den drehzahlabhängigen Eisenverlust – und $b = M_{vR} = 1{,}047$ Nm als Achsenabschnitt direkt den praktisch konstanten Reibungsanteil am Antriebsmoment M_0 dar. Damit ergibt sich beispielhaft der Eisenverlustanteil des Leerlaufmomentes M_{vFeN} bei der Drehzahl $n_N = 187{,}5\ \mathrm{min}^{-1}$, was bei der hier untersuchten 32-poligen TFM einer elektrischen Frequenz $f_{1N} = 50$ Hz entspricht, zu

$$M_{vFeN} = a \cdot \left(\frac{n_N}{\mathrm{min}^{-1}}\right)^{0,6} = M_{0N} - M_{vR} = 3{,}279\,\mathrm{Nm}$$

und man kann daraus den Wert des Eisenverlustwiderstandes R_{FeN} für die 3-strängige Maschine bei der gewählten Drehzahl n_N wie folgt bestimmen

$$U_{10N} = c_U \cdot n_N = 162{,}2\,\mathrm{V}$$
$$P_{vFeN} = \omega \cdot M_{vFeN} = 2\pi n_N \cdot M_{vFeN} = 64{,}38\,\mathrm{W}$$
$$R_{FeN} = \frac{m_1 U_{10N}^2}{P_{vFeN}} = 1226\,\Omega.$$

Ist der Eisenverlustwiderstand für eine Drehzahl, z. B. für n_N, bekannt, so lässt er sich nach [2] direkt in der Form

$$R_{Fe} = \left(\frac{n}{n_N}\right)^{0,4} R_{FeN}$$

für jede beliebige andere Drehzahl n umrechnen.

Dabei wird der Eisenverlustwiderstand i. d. R. direkt an den Anschlussklemmen angeordnet, was insbesondere bei den hier betrachteten peSM und den dabei bevorzugten Steuerverfahren mit guter Genauigkeit zulässig ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen einer Bachelorarbeit im Labor Elektrische Antriebe und Anlagen der Hochschule Esslingen wurde im Wintersemester 2010/11 ein einfach handhabbares, zuverlässiges Verfahren zur Trennung der mechanischen und der Eisenverluste bei permanent erregten Synchronmaschinen entwickelt und begründet.

Das Verfahren wurde beispielhaft an einer Transversalflussmaschine erprobt und hier mit konkreten Zahlenwerten vorgestellt.

Wegen der bei peSM der Polpaarzahl p zur Drehzahl n streng proportionalen Frequenz $f_1 = p \cdot n$ lassen sich alle zuvor abgeleiteten Zusammenhänge mit entsprechend umgerechneten Faktoren auch für die Frequenz f_1 angeben.

Literatur

[1] Dimitrij Kujat, Bachelorarbeit WS 2010/11, Hochschule Esslingen
Untersuchung eines Transversalflussgenerators für getriebelose Windkraftanlagen

[2] Eugen Nolle, Vorlesung Elektrische Maschinen 1 u. 2, Hochschule Esslingen

Direkt einsteigen, Praxisluft schnuppern, Projekte erleben, Verantwortung übernehmen. Wenn Sie den Antrieb haben viel zu bewegen, würden wir uns gerne bei Ihnen bewerben. Lernen Sie jetzt die MBtech kennen – das weltweit tätige Automotive Engineering- und Consulting-Unternehmen. Wir entwickeln die Zukunft der Mobilität, angetrieben von unserer Leidenschaft zum Automobil. Entdecken Sie hochspannende Aufgaben und ausgezeichnete Entwicklungschancen.

Jetzt schnell schalten und durchstarten: mbtech-group.com/karriere

MBtech
Mercedes-Benz technology