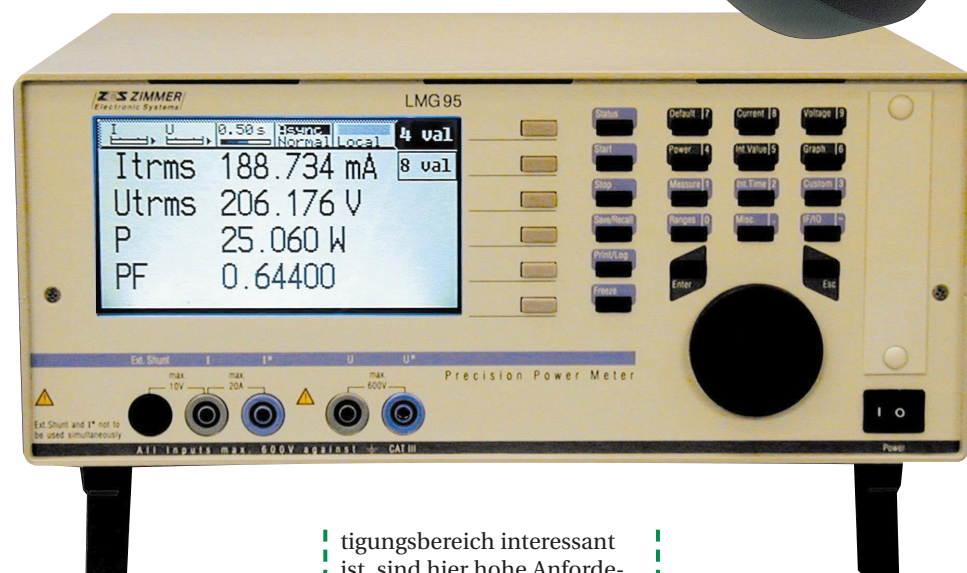


Intelligent messen

Hochgenaue Bestimmung der Verlustleistung an Blech- und Ferritkernen

Mit Hilfe des Präzisionsleistungsmessgerätes LMG95 bekommt man neben der exakten Verlustleistungsmessung an Magnetmaterialien auch Zugang zu anderen magnetischen Kenngrößen. So lassen sich die Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte sowie die Amplitudenpermeabilität eines Prüflings auch bei hohen Signalfrequenzen bestimmen. In der Materialprüfung können auch fertig bewickelte Kerne ausgemessen werden.

Mario Baussmann,
Harald Gebattel*



Ein wesentliches Qualitätsmerkmal weichmagnetischer Materialien ist die Einhaltung von Verlustleistungsgrenzwerten bei definierter Frequenz und Flussdichte. Weil die Flussdichte in Kernen nur mit hohem Aufwand messbar ist, schreiben viele Messvorschriften sinusförmige Feldstärke oder sinusförmige Flussdichte vor. Diese vereinfachte mathematische Behandlung führt aber dadurch zu wesentlich aufwändigeren Prüfspannungsquellen. Da gerade auch der Sättigungsbereich interessant

*Mario Baussmann ist Entwicklungsingenieur, Harald Gebattel Applikationsingenieur bei der ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH in Oberursel.

ist, sind hier hohe Anforderungen zu stellen.

Eleganter und kostengünstiger ist der Einsatz „intelligenter“ Messgeräte und die Zulassung beliebiger Kurvenformen durch bessere mathematische Ansätze. So lassen sich preiswerte Prüfspannungsquellen verwenden. Selbst das normale Versorgungsnetz mit seinem hohen Oberwellenanteil ist für 50-Hz-Prüflinge geeignet.

Die Verlustleistung eines Kernels ist der Fläche der umlaufenen Hystereseschleife proportional; sie ist eine Funktion der Temperatur, der Frequenz, der Flussdichte, des Kern-Materials und der Kernform. Durch Einspeisen eines Stroms mit beliebiger Signalform auf der Primärseite eines bewickelten Kernels und die Messung

des Primärstroms und der Leerlaufspannung auf der Sekundärseite, lässt sich die Verlustleistungsmessung des Kernels mit dem Messgerät LMG95 realisieren. Die Integration der Hystereseschleife entspricht der gemessenen Wirkleistung, also der Verlustleistung im Kernmaterial. Die Gesamtverlustleistung P_v eines bewickelten Kernels setzt sich zusammen aus P_v -Hysterese, P_v -Wirbelstrom, P_v -Wicklung und P_v -Rest.

Zur Messung der Kernverlustleistung sollen die Wicklungsverluste nicht mitgemessen werden (Bild 1). Hier ist die gesuchte Verlustleistung $P_v = U_{trms} \cdot I_{trms} \cdot \cos(\varphi)$.

Der durch den Kupferwiderstand der Primärwicklung hervorgerufene Spannungsabfall geht nicht in die Messung ein, da auf der Primärseite nur der Strom gemessen wird. Um die eigentliche Magnetisierungsspannung zu messen, wird auf der Sekundärseite stromlos gemessen. Die gesamten Kupferverluste werden also in der vorliegenden Schaltung nicht mitgemessen.

Die genaue Messung von U_{rms} , I_{rms} und $\cos(\varphi)$ macht das dynamische Durchlaufen der Hystereseschleife und deren Integration unnötig. Die Verlustleistung lässt sich mit dem Präzisionsleistungsmessgerät LMG95 direkt messen und in Echtzeit ablesen.

Bei der Lösung dieser anspruchsvollen Messaufgabe sollten einige Details beachtet werden:

$$\frac{\Delta P_v}{P_v} = \frac{\Delta U_{rms}}{U_{rms}} + \frac{\Delta I_{rms}}{I_{rms}} + \frac{\Delta \cos(\varphi)}{\cos(\varphi)} \quad (1)$$

Die Fehlerrechnung für die Verlustleistung zeigt:

Der Gesamtfehler der gemessenen Verlustleistung setzt sich also aus einem Amplitudenfehler der gemessenen Spannung, einem Amplitudenfehler des gemessenen Stroms und einem Laufzeitdifferenzfehler der U- und I-Signale zusammen. Die Laufzeitdif-

ferenz entsteht durch die verschiedenen Signallaufzeiten im Spannungs- und Strompfad.

Da die Verluste meist klein sind, und die Phasenverschiebung somit fast 90° beträgt ist $\cos(\varphi)$ fast gleich Null und $\Delta \cos(\varphi)$ wird durch eine sehr kleine Zahl dividiert. Der Fehler $\Delta \cos(\varphi)/\cos(\varphi)$ fällt also besonders stark ins Gewicht.

Hier ein Zahlenbeispiel: Bei der Messung an einem Ferritkern sei $\cos(\varphi)=0,06$, der Primärstrom sinusförmig und die Frequenz $f=50$ kHz. Mit $\varphi=t \cdot 360^\circ \cdot f$ führt bereits ein Laufzeitunterschied von $3,8$ ns zu einem Fehler $\Delta \cos(\varphi)/\cos(\varphi)$ von 2%. Dies ist die Signallaufzeit auf weniger als 1 m Messleitung. Zu dieser Messunsicherheit kommen die Amplitudenfehler $\Delta U/U$ und $\Delta I/I$, die aber vernachlässigbar klein sind. Bei den üblicherweise oberwellenhaltigen Strömen und Spannungen wird der laufzeitbedingte Fehler noch stärker wirksam.

Bei der Auswahl der geeigneten Messgeräte muss also nicht nur auf eine gute Amplitudengenauigkeit, sondern vor allem auf eine gute Leistungsgenauigkeit geachtet werden. Auch ein sorgfältiger Versuchsaufbau trägt zu exakten Messergebnissen bei: man muss für eine gute Messgenauigkeit möglichst kurze und gleich lange Messleitungen verwenden.

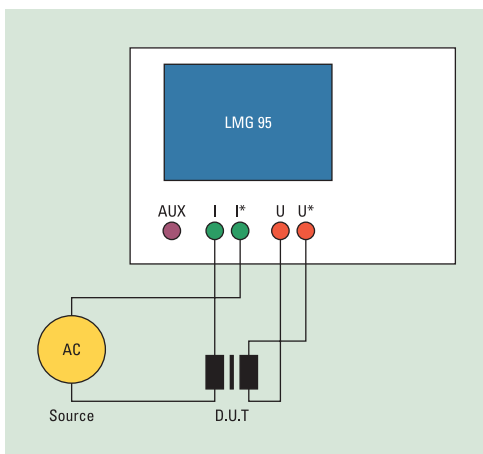


Bild 1:
Messaufbau
zur Kern-Ver-
lustleistung

ZES ZIMMER bietet speziell für diese Applikation einen Laufzeitabgleich ihres Gerätes an, mit dem Laufzeitunterschiede zwischen U- und I-Kanal von typisch < 4 ns realisiert werden.

Durch die vielseitigen Möglichkeiten des Leistungsmessgeräts hat man auch bei beliebigen Signalformen Zugang zu weiteren magnetischen Kenngrößen.

Bestimmung der magnetischen Feldstärke

Der Spitzenwert der magnetischen Feldstärke (Hpk) errechnet sich aus der ersten Maxwellschen Feldgleichung

$$\oint_C \vec{H} d\vec{s} = \int_A \vec{J} d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int_A \vec{D} d\vec{A} \quad (2)$$

mit der Nebenbedingung für quasistationäre Felder:

$$\frac{\omega \epsilon}{\kappa} \ll 1 \quad (3)$$

$$H_{pk} = \frac{I_{pk} \cdot n_1}{l_{magn}} \quad (4)$$

Hpk ist der Spitzenwert der magnetischen Feldstärke im Ferritkern, n1 ist die primäre Windungszahl, Ipk ist der Spitzenwert des primären Stroms und lmagn die magnetische Weglänge. Hpk wird unabhängig von der Kurvenform des Primärstroms exakt bestimmt. Die einzige Voraussetzung ist, dass der Strom symmetrisch sein muss, also Ipk=Ipp/2. Die Formel in der Notation des Formeleditors im LMG95 lautet:

$$H_{pk} = I_{pp}/2 \cdot n_1 / l_{magn} \quad (5)$$

Bestimmung der magnetischen Flussdichte

Der Spitzenwert der magnetischen Flussdichte (Bpk) ergibt sich aus der zweiten Maxwellschen Feldgleichung

$$\frac{1}{dA} \oint \vec{E} d\vec{s} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (6)$$

mit der Nebenbedingung (Gleichung 3) und der Annahme der geometrisch

Bild 2: Gleichungen zur Bestimmung magnetischer Kenndaten, programmiert im Formeleditor des LMG95

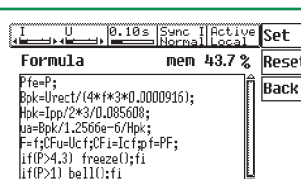
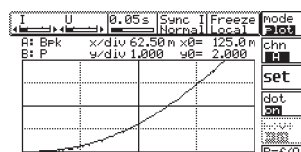


Bild 3: Darstellung der Messwerte in Textform

Pfe	6.45658 m
Bpk	17.2996 m
Hpk	3.32315
ua	4.14274 k
F	51.6381 k
CFu	1.63513
CFi	1.49917
pf	91.4917 m

Bild 4: xy-Plot der Kernverlustleistung über der magnetischen Flussdichte



gleichverteilten Flussdichte im Kernmaterial:

$$-\frac{1}{n_2 \cdot A} \cdot u(t) = \frac{dB(t)}{dt} \quad (7)$$

n2 ist die sekundärseitige Windungszahl, A die Querschnittsfläche des Ferritmateri- als, u(t) ist der Zeitverlauf der induzierten Spannung an der Sekundärwicklung. B(t) ist minimal/maximal für dB(t)/dt=0, also bei den Nulldurchgängen der induzierten Spannung. Die Integration zwischen zwei Nullstellen der induzierten Spannung liefert den Peak-Wert der magnetischen Flussdichte:

$$-\frac{1}{n_2 \cdot A} \cdot \int_{t_0}^{t_1} u(t) dt = B_{pp} \quad (8)$$

Bpp ist der Spitze-Spitze-Wert der magnetischen Flussdichte im Kern, t0 ist der Beginn einer Periode der induzierten Spannung, t1 ist der Zeitpunkt der Nullstelle der induzierten Spannung innerhalb der Periode.

Da die induzierte Spannung keinen Gleichanteil enthält (Udc=0), gilt:

$$\int_{t_0}^{t_1} u(t) dt = - \int_{t_1}^T u(t) dt \quad (9)$$

T ist die Periodendauer der induzierten Spannung.

Daraus folgt:

$$\int_{t_0}^{t_1} u(t) dt = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T |u(t)| dt \quad (10)$$

Dieses Integral ist auch im Gleichrichtwert der induzierten Spannung (Urect) enthalten:

$$U_{rect} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (11)$$

Der Gleichrichtwert ist im Präzisionsleistungsmessgerät als Rechengröße verfügbar. Die Flussdichte berechnet sich also aus folgender Formel:

$$B_{pk} = \frac{U_{rect}}{4 \cdot f \cdot n_2 \cdot A} \quad (12)$$

f=1/T ist die Signalfrequenz der induzierten Spannung. Bpk wird unabhängig von der Kurvenform der Sekundärspannung exakt bestimmt.

Diese Gleichung lautet in der Notation des LMG95:

$$B_{pk} = U_{rect} / (4 \cdot f \cdot n_2 \cdot A) \quad (13)$$

Bestimmung der Amplitudenpermeabilität

Aus den nun bekannten Größen Spitzenwert der Flussdichte (Bpk) und Spitzenwert der Feldstärke (Hpk) (Gleichung 4 und 12) berechnet sich die

www.elektronikpraxis.de

Datenblatt des Präzisionsleistungsmessgerätes LMG95

Anwendungsbeispiele des Leistungsmessgerätes

Amplitudenpermeabilität (μa) aus folgender Gleichung:

$$\mu_a = \frac{B_{pk}}{\mu_0 \cdot H_{pk}} \quad (14)$$

In der Notation des LMG95:

$$ua = B_{pk} / H_{pk} / 1,2566e-6 \quad (15)$$

Das Präzisionsleistungsmessgerät LMG95 ist mit der Signalquelle und dem Prüfling verbunden (Bild 1). Nachdem die Formeln aus Bild 2 in den Formeleditor einprogrammiert wurden, lassen sich die gemessenen und berechneten Werte direkt und in Echtzeit ablesen (Bild 3), graphisch dargestellt (Bild 4) oder in Form einer Liste ausdrucken.

Anzeige von Flussdichte und Verlustleistung

Insbesondere die nicht direkt messbaren Größen Hpk und Bpk lassen sich direkt anzeigen (Bild 2, 3 und 4).

Aus dem Gleichrichtwert der induzierten Spannung, der Frequenz, dem Peak-Wert des Primärstroms und den geometrischen Daten des Kerns ist es möglich, in dem Formeleditor des LMG95 direkt die magnetische Flussdichte, die magnetische Feldstärke und die Amplitudenpermeabilität auszurechnen und zusammen mit der gemessenen Verlustleistung zur Anzeige zu bringen. Die Größen lassen sich direkt im Gerät graphisch darstellen, oder über die integrierten Schnittstellen ausdrucken bzw. zum PC übertragen. (jm)

Kennziffer: 315